

INTERPRETACION DE CURVAS DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

21

Versión española de la publicación
«INTERPRETATSIIA KRIVYJ VERTIKAL'NOGO
ELEKTRICHESKOGO ZONDIROVANIIA»,
de E. N. KALENOV

INTERPRETACION DE CURVAS DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

Versión española de la publicación
«INTERPRETATSIIA KRIVYJ VERTIKAL'NOGO
ELEKTRICHESKOGO ZONDIROVANIIA»,
de **E. N. KALENOV**

TITULO ORIGINAL:
"INTERPRETATSIIA KRIVYJ VERTIKAL'NOGO
ELEKTRICHESKOGO ZONDIROVANIIA"
MOSCU 1957.

DIFUSION EN ESPAÑA, Y PAISES DE LENGUA
ESPAÑOLA, AUTORIZADA POR
MEZHDUNARODNAIA KNIGA (MOSCU).

EDICION PROMOVIDA POR LA DIRECCION
GENERAL DE CARRETERAS, DEL MINISTERIO
DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO.

TRADUCCION: J. GONZALEZ MONTERO
Dr. Ingeniero de Minas. Dirección General
de Carreteras.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones
28046 Madrid

NIPO: 151-87-117-3
ISBN: 84-7433-513-2
Depósito Legal: M. 39912-1987

Imprime: ARTEGRAF
Sebastián Gómez, 5. 28026 Madrid

INDICE

	<u>Página</u>
PRESENTACION	5
PROLOGO	7
INTRODUCCION	9
1. El corte geoelectrico	9
2. Resistividad media transversal y longitudinal de un medio heterogeneo. Anisotropía. Paradoja de anisotropía	12
3. Las diagramas de sondeos mecanicos en la determinación de los parametros del corte geoelectrico	22
4. Definición de la curva de SEV. Utilización de la escala logarítmica en la representación gráfica	25
5. Tipos de curvas de SEV	33
6. Directrices para la interpretación cualitativa y cuantitativa de las curvas de SEV	37
 CORTE ELECTRICO DE DOS CAPAS	
7. Forma de la curva de SEV de dos capas y procedimiento para su interpretación en el caso de límite de separación horizontal	41
8. Caso de confinamiento lateral de las capas	45
9. Curvas de SEV e interpretación de las mismas para el caso de límite de separación de los medios inclinado	50
10. Curvas de SEV en las proximidades del límite de separación vertical de dos medios	63
11. Ejemplos de aplicación práctica de los abacos de curvas de SEV de dos capas	65
12. Interpretación cualitativa de curvas de SEV de dos capas	71
 CORTE ELECTRICO DE TRES CAPAS	
13. Abacos de curvas de SEV de tres capas	75
14. Representación gráfica de las curvas de tres capas. Puntos y abacos auxiliares para las curvas de tipo H, A, K y Q. Nomogramas de Bogdanov	82
15. Principio de equivalencia	96
 CURVAS DE SEV DE TIPO H	
16. Variación de la posición del punto mínimo en la curva de SEV en función de los parametros del corte	107

17. Relación entre la conductancia longitudinal total, los parámetros de las capas del corte y las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV	123
18. Resistividad media longitudinal (ρ_l) del corte y variación de la misma en función de los parámetros de las capas, para $\rho_3 = \infty$	128
19. Resistividad media longitudinal (ρ_l) del corte y variación de la misma en función de los parámetros de las capas $\rho_3 \neq \infty$	133
20. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo H	140
21. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo H	159

CURVAS DE SEV DE TIPO A

22. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo A. Cálculo de los parámetros ρ_2 y ρ_l . Dependencia de la variación de ρ_l de los parámetros de las capas del corte	187
23. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo A	194

CURVAS DE SEV DE TIPO K

24. Variación de la posición del punto máximo en las curvas de SEV en función de los parámetros del corte	204
25. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo K. Cálculo del parámetro ρ_2	217
26. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo K	221

CURVAS DE SEV DE TIPO Q

27. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo Q. Cálculo del parámetro ρ_2	232
28. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo Q	237

CORTE ELECTRICO DE CUATRO CAPAS

29. Abacos de curvas de SEV de cuatro capas	248
30. Construcción gráfica de curvas de SEV de cuatro y más capas	250
31. Propiedades de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA. Condiciones de interpretación para $\rho_4 = \infty$	259

32. Dependencia de la posición de los puntos extremales en las curvas de SEV de tipo KH, de los parámetros del corte. Cálculo del efecto pantalla de las rocas de alta resistividad	263
33. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA. Cálculo de las resistividades de las capas	270
34. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA	286
35. Curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ, QQ y su interpretación	312
36. Breves conclusiones sobre la metodología de interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas	330

INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV EN EL CASO DE CORTE ELECTRICO DE CAPAS MULTIPLES

37. Curvas teóricas de SEV en los cortes de capas múltiples para $\bar{\rho}_{ha} = \infty$ e interpretación cuantitativa de las mismas	337
38. Cálculo generalizado de las resistividades paramétricas en el corte de capas múltiples. Interpretación de las curvas de SEV de capas múltiples para $\rho_{ha} = \infty$	340
39. Interpretación de curvas de SEV de capas múltiples para $\rho_{ha} \neq \infty$	348
40. Interpretación de curvas de SEV calculadas y prácticas en un corte de capas múltiples con horizonte de apoyo conductor	349
41. Sobre la interpretación cualitativa de curvas de SEV de capas múltiples	356

INTERPRETACION PRACTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS SEV

42. Análisis de las curvas de SEV efectuadas junto a sondeos mecánicos. Cálculo de la situación estratigráfica del horizonte de apoyo	365
43. Ejemplos prácticos de interpretación de curvas de SEV	378

PRESENTACION

Cuando se realiza la auscultación del terreno mediante prospección geoelectrica, tanto para aplicaciones de ingeniería civil como para explotación de aguas subterráneas, el dispositivo SEV (Sondeo Eléctrico Vertical) es el más utilizado. Como la interpretación de la correspondiente curva de campo admite generalmente varias soluciones, es preciso elegir la que tenga más afinidad con la verdadera estructura de la zona a reconocer, contando siempre con la ayuda de los estudios geológicos y geotécnicos existentes.

E. N. Kalenov, basándose en la experiencia de la explotación de grandes superficies, en diversas áreas geológicas de la Unión Soviética, sintetizó y generalizó de modo crítico una guía práctica para la interpretación de curvas de SEV, que fue plasmada en la publicación «Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales».

En el año 1974, la Dirección General de Carreteras acometió la importante tarea de traducir y editar dicho texto que en esa fecha constituyó un indudable éxito entre sus propios servicios de estudio de materiales y auscultación del terreno, departamentos científicos de universidades y otros centros de investigación.

Transcurridos trece años desde esa fecha y una vez agotada la primera edición, se ha considerado conveniente reeditar dicha publicación en un nuevo formato y con las oportunas correcciones, dado el interés creciente que los métodos geofísicos tienen actualmente entre las técnicas de reconocimiento geotécnico, como se ha puesto de manifiesto en el último Congreso Mundial de Carreteras celebrado en Bruselas.

Esperamos que este texto tenga la acogida y llene las expectativas de cuantos trabajan en el campo de la geofísica y deseamos sea para ellos un instrumento valioso para el mejor conocimiento del terreno en las diferentes facetas en las que de una u otra forma interviene.

Madrid, 1987.

José A. Hinojosa Cabrera
Ingeniero Jefe
del Servicio de Geotecnia

PROLOGO

El autor publicó un primer libro dedicado a la interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) en el año 1939, con una tirada pequeña que se agotó al poco tiempo. En el año 1948, fue publicado otro trabajo análogo. Este libro de A. M. Pylaev, nos ha dejado un gran recuerdo del autor, que dio su vida por la patria, constituyendo ahora una rareza bibliográfica.

Desde la publicación de estos trabajos de prospección eléctrica, se han explorado grandes superficies de la Unión Soviética y se ha adquirido una amplia experiencia en la interpretación de resultados, para condiciones geológicas diversas.

En los últimos años la prospección eléctrica ha obtenido bastantes éxitos, descubriendo en diversas zonas de la Unión Soviética yacimientos de petróleo y gas y otros yacimientos de minerales útiles.

Por ello desde hace tiempo se experimentaba la necesidad de sistematizar y generalizar de modo crítico el bagaje de conocimientos adquiridos en la interpretación de SEV y crear con ello una guía práctica, de la que sentían una necesidad aguda los técnicos de campo de la exploración eléctrica, sobre todo los especialistas más jóvenes.

En el presente libro se ha intentado abarcar en lo posible todo el fundamento de la posición actual sobre métodos de interpretación de las curvas de SEV.

En el trabajo del autor lo fundamental ha sido los muchos años de experiencia en la labor de interpretación de las curvas de SEV, así como el conjunto de datos suministrados por los especialistas en prospección petrolífera de la Unión Soviética. En el presente libro, junto con las investigaciones del autor, se recogen también las de los colaboradores científicos de VNII Geofísica, A. M. Zagarmistr, G. D. Tsekov, M. N. Berdichevsk y K. A. Shajnes.

Como es lógico, el libro no da respuesta a todas las preguntas que surgen en la práctica de la interpretación de las curvas de SEV. Ello es debido, en primer lugar, a una serie de problemas de exploración eléctrica aún no suficientemente estudia-

dos, pero tal vez también a omisión del autor. Por ello recibirá con toda atención y agradecimiento las indicaciones que se le dirijan para la mejora de este libro.

Ha sido de gran ayuda en la confección y redacción del libro la colaboración de los científicos de VNII Geofísica, H. C. Krolenko-Gorshkov, L. P. Dolin y especialmente la de E. V. Biri-

kov, O. I. Bogdanov y D. P. Fedorov, que han realizado una tarea muy laboriosa, comprobación detallada del texto, preparación de gráficos y confección del original. El autor tiene la satisfacción de expresarle a todos ellos su profunda gratitud.

INTRODUCCION

1. El corte geoelectrico

El sondeo eléctrico vertical es una de las modalidades de prospección eléctrica con corriente continua. Puede realizarse con diversos dispositivos. La prospección eléctrica en los trabajos para gas y petróleo se hace normalmente con dispositivo de cuatro electrodos simétricos. Es precisamente en este dispositivo en el que se basan la mayor parte de los cálculos teóricos de interpretación de resultados. Por ello en el presente manual se trata fundamentalmente de la interpretación de las curvas de sondeo eléctrico vertical (abreviadamente SEV) con dispositivo de cuatro electrodos simétricos. Esta metodología puede utilizarse también en la interpretación de los resultados de sondeos con dispositivo acimutal y en particular con el dipolar ecuatorial que en los últimos años empieza a introducirse en la práctica de la prospección eléctrica.

El objeto de la prospección por medio de SEV consiste en la determinación del corte geoelectrico (corte vertical del terreno formado por capas de distinta resistividad).

Los factores de los que depende la resistividad de una roca se conocen por la interpretación de las diagráfias eléctricas en sondeos mecánicos. En la figura 1 se indican los límites de variación de la resistividad de algunas rocas.

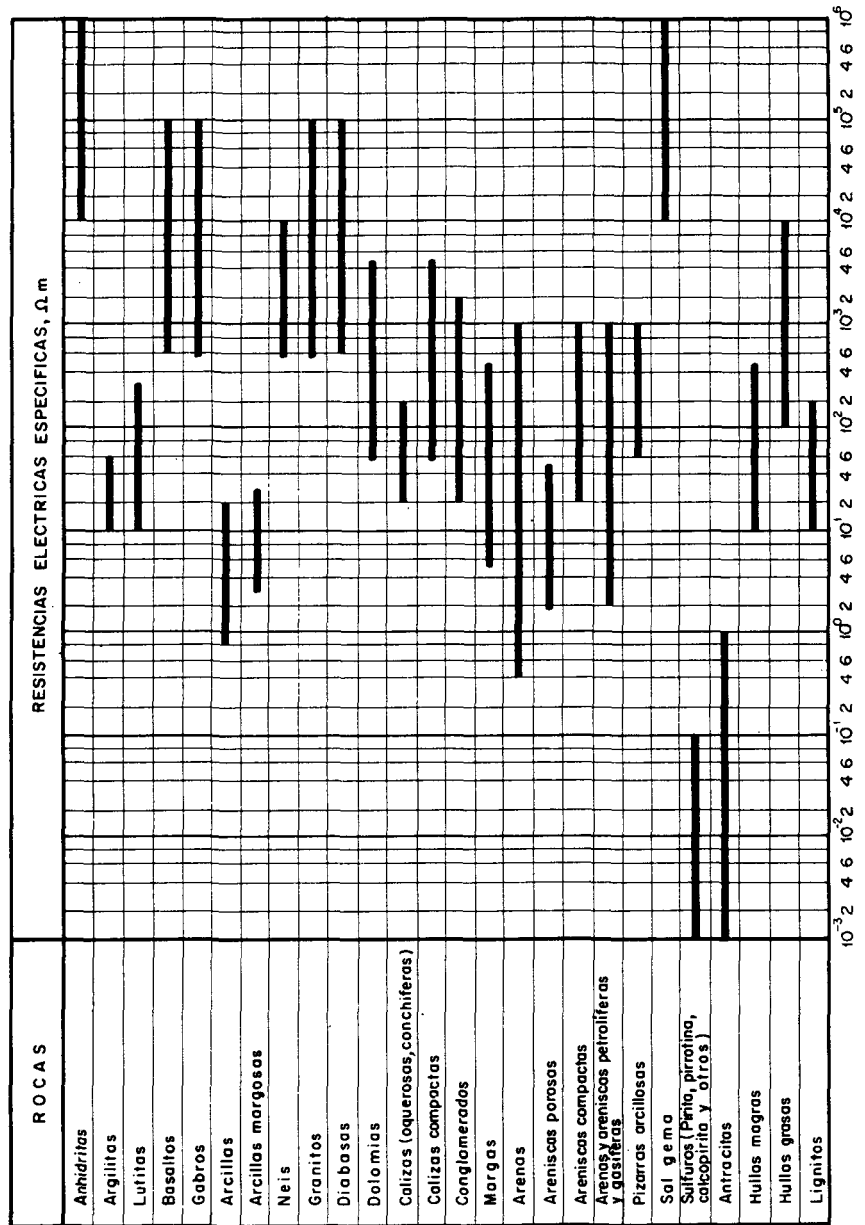
El corte geoelectrico y el corte geológico se diferencian en que éste tiene sus límites de separación en las capas del terreno mientras que aquél acusa tan sólo los cambios de resistividad. Los límites de ambos pueden o no coincidir. En un mismo nivel estratigráfico se pueden encontrar dos o más capas de distinta resistividad. Ello puede depender del grado de saturación de la roca y de la mineralización de las aguas que la impregnan. A veces se observa lo contrario: capas de diferente composición y edad se comportan eléctricamente como una sola capa homogénea. Es decir, el número de capas y la situación de sus límites de separación pueden ser distintos en el corte geológico y en el geoelectrico.

El conocimiento de la composición, edad y resistividad de la roca en el corte estratigráfico de la zona que examinamos se obtiene generalmente por los resultados de los sondeos mecánicos. En la figura 2 se representa un esquema de corte geoelectrico. La resistividad de las capas del corte se ha fijado, en primera aproximación, por los resultados obtenidos en la testificación de sondeos mecánicos.

Estudiemos el corte geoelectrico representado en dicha figura 2. En lugar de los doce estratos delimitados desde la

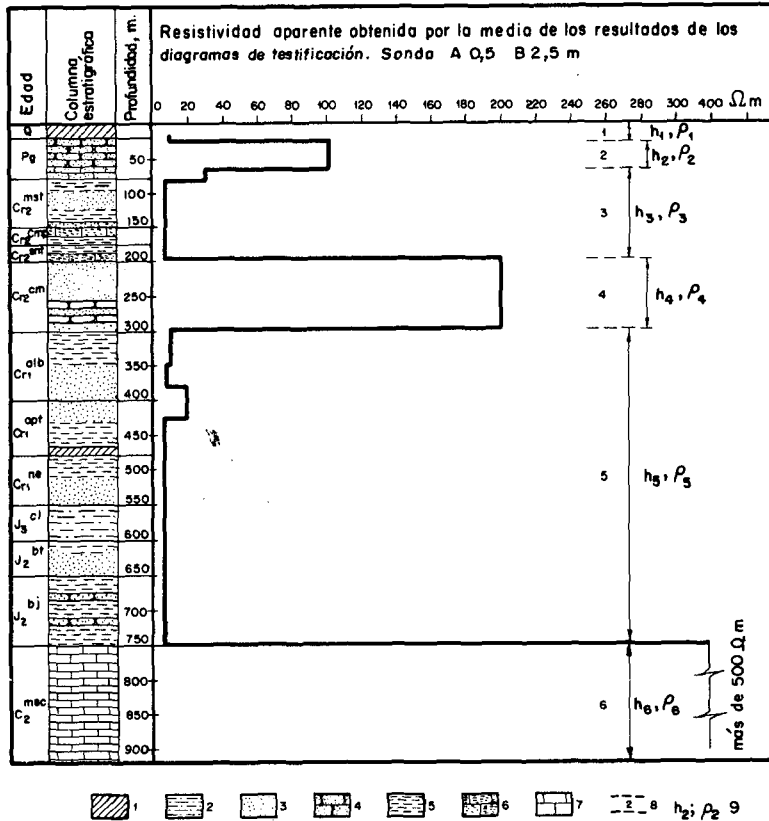
superficie del terreno hasta los sedimentos del Carbonífero Medio, de resistividad muy alta, las características eléctricas del terreno nos pone de manifiesto tan sólo cinco capas de conductividad diferente. Sedimentos distintos poseen igual resistividad dentro de un mismo estrato geológico; prácticamente son iguales las de todos los complejos litológicamente heterogéneos del Cretácico y Jurásico. Tan sólo los límites estratigráficos entre Santoniense Cenomanense-Albense y Jurásico-Carbonífero coinciden con

Fig. 1.—
Resistividades
eléctricas de
algunas rocas
(según V. N.
Dajnov).



los límites de separación eléctrica. Es decir, se comprueba que el corte geoelectrico, en el caso que estamos analizando, consta de seis capas. Estas capas se denominan eléctricas. Generalmente se caracterizan por su espesor (en metros) que se indica con la letra h y un subíndice que corresponde al número de orden de la capa contando desde la superficie y por su resistividad ρ (en ohm.m) con el mismo subíndice. Los valores de h_i y ρ_i se denominan parámetros eléctricos de la capa i y al corte, para simplificar, también se le llama eléctrico.

Fig. 2.—
Representación
del corte
geoelectrico.
1—Tierras
arcillosas;
2—Arcilla arenosa;
3—Arenas;
4—Arenisca;
5—Arcilla;
6—Tierra de
moldeo; 7—Caliza;
8—Horizonte
eléctrico;
9—Espesor y
resistividad
correspondientes
al horizonte
eléctrico.



Las capas del corte geoelectrico se ponen de manifiesto en los sondeos verticales efectuados en el terreno que investigamos y las mismas poseen resistividades que se diferencian notablemente de la resistividad de la capa inferior. Esta capa inferior se denomina horizonte eléctrico de apoyo.

En el ejemplo examinado la caliza del Carbonífero Medio se diferencia por su resistividad (más de 500 ohm.m) de las capas que la recubren pertenecientes al Cretácico y Jurásico (resistividades entre 10 y 7 ohm.m). Dicha caliza sirve en este caso como horizonte de apoyo. La relación de resistividades entre los dos complejos indicados es aproximadamente igual a 50. En estas condiciones la resistividad de la roca soporte puede decirse que es infinitamente grande ($\rho_{ha} = \infty$).

El horizonte eléctrico de apoyo puede ser una capa de resistividad baja (que se llama a veces horizonte conductivo) si se aprecia con claridad una variación de resistividad respecto a las capas superiores.

El principal problema que se plantea en el método de exploración eléctrica mediante SEV es el de hallar las variaciones de la profundidad del horizonte eléctrico de apoyo (1) en la zona que se estudia. El objeto de esta investigación estriba en obtener una idea sobre el comportamiento de la superficie del horizonte de apoyo que ayude a resolver diversos problemas geológicos (zonas tectónicas, localización de estructuras sepultadas, etc.). También con ayuda de los SEV se logra estudiar el cambio lateral de facies en grandes extensiones de terreno.

(1) En lo sucesivo y para simplificar lo llamaremos horizonte de apoyo.

La profundidad a que se encuentra la superficie del horizonte de apoyo se representa generalmente por la letra H y es igual a la suma de los espesores de todas las capas eléctricas del corte que descansan sobre el mismo. Es decir, en el caso de un corte de n capas, $H = h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}$.

Si el medio que se estudia mediante la exploración eléctrica está separado de la atmósfera por un plano y se considera como un semiespacio infinito, homogéneo e isótropo, entonces el valor de la resistividad del mismo se calcula con ayuda del SEV por la fórmula

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}$$

en la que K es un coeficiente que depende de la forma y extensión del dispositivo electródico; ΔU es la diferencia de potencial observada entre los electrodos centrales (en mV) e I (en mA) representa la intensidad de la corriente que se transmite al medio que se investiga, a través de los electrodos extremos.

En la realidad de la exploración eléctrica no se encuentran estos casos ideales. El medio que estudiamos, por lo general, se compone de capas no homogéneas y anisótropas poseyendo resistividades diversas; a menudo los límites de sus capas no son horizontales. Por ello, el valor de la resistividad obtenida durante el proceso de sondeo con ayuda de la fórmula anterior y calculada para un semiespacio homogéneo no es constante. Depende de la resistividad verdadera de las rocas componentes de las capas cortadas, de las condiciones de su estratificación, de la forma del dispositivo, distancia entre electrodos de distribución, etc. De ello se deduce que el valor obtenido en la exploración eléctrica con la fórmula indicada no puede considerarse como correspondiente a la resistividad verdadera del medio. Quedamos de acuerdo en llamarla resistividad aparente y la designaremos por medio de ρ_a o de $\bar{\rho}$. Nosotros utilizaremos la segunda denominación.

La resistividad aparente de la roca, obtenida mediante las lecturas efectuadas con un dispositivo determinado, se toma como resistividad verdadera de un medio homogéneo ficticio en el que, para este dispositivo electródico dado, con idéntica potencia que suministra la misma corriente I se produce igual diferencia de potencial entre los electrodos correspondientes que en el caso del medio heterogéneo que se estudia.

Nos detendremos en algunas particularidades eléctricas inherentes al medio heterogéneo.

2. Resistividad media transversal y longitudinal de un medio heterogéneo. Anisotropía. Paradoja de anisotropía

Imaginemos un conjunto de sedimentos formado por m capas estratificadas horizontales de espesor h_i y resistividad eléctrica verdadera ρ_i . Supongamos que el espesor total de estos estratos es:

$$H = \sum_{i=1}^m h_i$$

Este medio no posee igual resistencia a la corriente eléctrica en las distintas direcciones. A esta propiedad se le denomina anisotropía. Es evidente que la resistividad del medio anisótropo será máxima cuando la corriente pasa por él en dirección perpendicular a la estratificación. En este caso los conductores de corriente (capas) quedan dispuestos como si estuvieran en serie y la resistividad total del medio será la suma de las resistividades de sus capas. Si la corriente circula en la dirección de la estratificación, entonces las capas se comportan como si estuvieran en paralelo y la resistividad del complejo sería mínima. En exploración eléctrica se considera como suma de las resistencias transversales del medio anisótropo, el valor $T = \sum h_i \cdot \rho_i$. Por el contrario, no se suele considerar la suma de las resistencias longitudinales del medio anisótropo. En su lugar se estudia la inversa de la resistencia, es decir, la conductancia del medio. La llamaremos conductancia longitudinal total del medio y se representa por S . Hallaremos las expresiones de T y S en función del espesor y resistividad de las capas componentes del conjunto de rocas que se explora.

Imaginemos que en el medio investigado hemos cortado una columna a base de 1×1 metros cuadrados y de altura $H = \sum h_i$ metros. Ella se compone, por tanto, de m capas con h_i metros de espesor y resistividad de ρ_i ohm.m. Supongamos que esta columna está conectada al circuito de la corriente eléctrica de tal modo que la misma pase perpendicularmente a su base. Entonces la resistividad medida al paso de la corriente por la columna, se puede calcular como si la corriente pasara a través de m conductores en serie, de sección transversal igual a la unidad (1 m^2) y longitud h_i en m. La resistencia de cada uno de estos conductores será, según la ley de Ohm,

$$T_i = \frac{\rho_i \cdot h_i}{1} = \rho_i \cdot h_i$$

La suma de las resistencias transversales T_i de toda la columna igual a la resistencia transversal total del medio, será por tanto:

$$T = h_1 \cdot \rho_1 + h_2 \cdot \rho_2 + \dots + h_m \cdot \rho_m = \sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^m T_i \quad (1)$$

Fácilmente se comprueba que esta fórmula está expresada en ohm.m².

Además del concepto de T se considera en exploración eléctrica el concepto de resistividad media transversal del conjunto de capas. Se define como la resistividad de un conductor homogéneo que tiene la misma forma que la columna estudiada anteriormente y que posee la misma resistencia total transversal a la corriente que fluye perpendicularmente a la base de la columna. Designando la resistividad media transversal del medio por ρ_t , se puede deducir la fórmula para la misma. De la igualdad:

$$\rho_t \cdot \sum_{i=1}^m h_i = \sum_{i=1}^m T_i$$

se obtiene,

$$\rho_t = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \quad (2)$$

Por tanto, si el medio investigado por la exploración eléctrica se compone, por ejemplo, de tres capas no homogéneas de roca, entonces la resistividad media transversal del medio será:

$$\rho_t = \frac{h_1 \cdot \rho_1 + h_2 \cdot \rho_2 + h_3 \cdot \rho_3}{h_1 + h_2 + h_3}$$

en que las h y ρ , con sus correspondientes subíndices representan el espesor y resistividad de las capas investigadas en el corte geoelectrico.

Supongamos que ahora la columna cortada en las rocas del medio de sección 1 m^2 está conectado al circuito de la corriente eléctrica paralelamente a la base de la columna. En este caso sus capas se pueden considerar como formando un conjunto de conductores en paralelo. La conductancia de este sistema es la suma de las conductancias de sus elementos. La conductancia de cada elemento, es decir, de cada capa del medio, es fácil ver que será igual a:

$$\frac{h_i \cdot 1}{\rho_i \cdot 1} = \frac{h_i}{\rho_i} = S_i$$

De aquí obtenemos que la suma de las conductancias longitudinales de toda la columna será:

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_m}{\rho_m} = \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i} = \sum_{i=1}^m S_i \quad (3)$$

Con ello queda determinada la conductancia longitudinal total del medio compuesto de diferentes capas en función de sus espesores y resistividades.

Del mismo modo que se ha introducido la noción de resistividad media transversal ρ_t del conjunto de capas atravesadas por la corriente en dirección perpendicular a la estratificación, también se ha hecho con la de resistividad media longitudinal de las mismas. La designaremos por ρ_l (en ohm.m).

De la analogía con lo visto para el valor de ρ_t se tiene:

$$\frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\rho_l} = S = \sum_{i=1}^m S_i$$

y, por tanto,

$$\rho_l = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^m S_i} = \frac{H}{S} \quad (4)$$

Los conceptos de conductancia longitudinal total S y de resistividad media longitudinal ρ_l de las capas, juegan un gran papel en la investigación, por el método del SEV, del corte geoelectrico en el que sirven de horizonte de apoyo rocas de resistividad muy alta.

Es fácil demostrar que ρ_t es mayor que ρ_l , es decir, que la resistencia del medio al paso de la corriente es siempre mayor si la misma pasa perpendicularmente a la estratificación que sí lo hace paralelamente.

El valor

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i \cdot \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^m h_i^2}}$$

se llama coeficiente de anisotropía del medio. Este coeficiente se puede considerar como un parámetro que fija la diferencia de las propiedades del medio respecto a la corriente eléctrica transmitida en las diferentes direcciones.

La raíz cuadrada del producto $\rho_t \cdot \rho_l$ se suele llamar resistividad media cuadrática del medio anisótropo y se designa mediante ρ_m ,

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i}}} = \frac{\rho_t}{\lambda} = \lambda \cdot \rho_l \quad (5)$$

El coeficiente de anisotropía del medio, para varias capas homogéneas e isotropas varía, como se deduce de su expresión, en función del espesor y resistividad de estas capas.

Veamos cómo cambia el coeficiente de anisotropía λ del medio en el caso más simple de dos capas, al cambiar las relaciones de sus espesores (h_1 y h_2) y resistividades (ρ_1 y ρ_2).

Si

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) (h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2)}{(h_1 + h_2)^2}}$$

llamando

$$\frac{h_2}{h_1} = \nu_1 \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \mu_1$$

obtendremos

$$\lambda = \frac{1}{1 + \nu_1} \sqrt{(1 + \nu_1 \mu_1) (1 + \frac{\nu_1}{\mu_1})} \quad (6)$$

La figura 3b representa el valor del coeficiente de anisotropía λ en función de $\nu_1 = h_2/h_1$ cuando los valores de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ son constantes. En la figura 3a se representa el caso en que λ varía en función de μ_1 , permaneciendo fijo ν_1 .

Los gráficos muestran que para μ_1 fijo, λ alcanza el máximo con $\nu_1 = 1$. En el caso en que sea constante el valor ν_1 , el coeficiente de anisotropía aumenta al aumentar μ_1 . El valor del coeficiente de anisotropía no cambia al sustituir ν_1 por $1/\nu_1$, si μ_1 permanece constante. En la fórmula (6) no es difícil ver que λ no varía al sustituir μ_1 por $1/\mu_1$, cuando ν_1 es constante. El valor de λ es la unidad cuando $\mu_1 = 1$ ($\rho_2 = \rho_1$) o cuando $\nu_1 = 0$ y $\nu_1 = \infty$ (si μ_1 es finito). Estos casos indican que el medio se compone tan sólo de una capa. Si en lugar de estar compuesto el medio por dos capas distintas isotrópicas (fig. 4a) se considera una serie de rocas que presentan la alternancia de dos subcapas delgadas isotrópicas de resistividades ρ_1, ρ_2 y espesores $\Delta h_{1i}, \Delta h_{2i}$ (fig. 4b), el coeficiente de anisotropía se puede calcular por la misma fórmula (6). Su magnitud no se diferencia de la magnitud del coeficiente de anisotropía del medio de dos capas considerado anteriormente siempre que la relación de las resistividades ρ_2/ρ_1 de las subcapas de la serie y de los espesores totales de

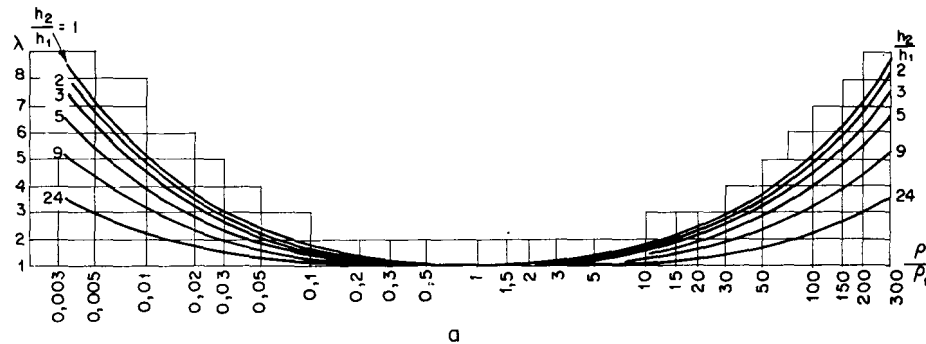
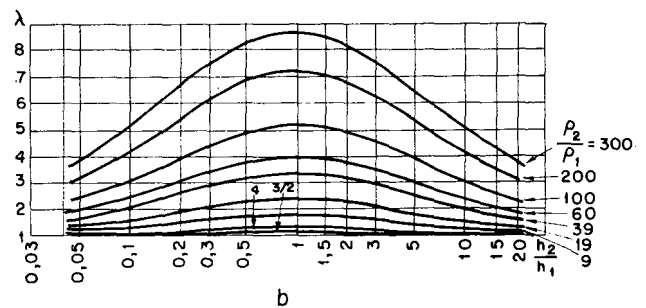


Fig. 3.—Variación del coeficiente de anisotropía, de un medio compuesto de dos capas, en función de

$$\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$\text{y } \nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$$



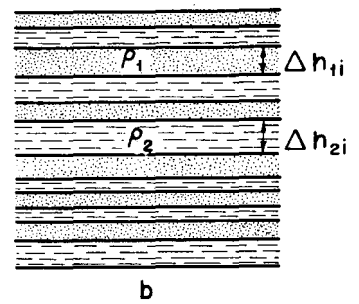
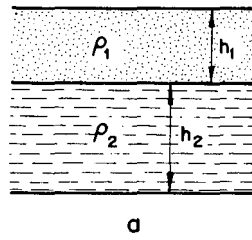
estas subcapas $h_2/h_1 = \Sigma \Delta h_{2i} / \Sigma \Delta h_{1i}$ sea la misma que en el caso del medio de dos capas.

La expresión análoga a la fórmula (6) es fácil de hallar para el coeficiente λ de un medio formado por cualquier número de capas de diferentes resistividades y espesores cualquiera.

En exploración eléctrica se distinguen varios tipos de anisotropía: pseudoanisotropía, macroanisotropía, microanisotropía y anisotropía global.

Fig. 4.—Casos de igualdad del coeficiente de anisotropía cuando son iguales

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \text{ y } \frac{h_2}{h_1} = \frac{\sum \Delta h_{2i}}{\sum \Delta h_{1i}}$$



Con el nombre de pseudoanisotropía se designa la anisotropía de un medio compuesto por dos o más capas (isótropas) cuyo conjunto se puede sustituir por una capa de espesor igual a la suma de los espesores de dichas capas y que equivale a ellas desde el punto de vista de la distribución del campo eléctrico.

Supongamos, por ejemplo, que el corte eléctrico consta de dos capas homogéneas e isotrópicas, estratificadas y con horizonte de apoyo de gran resistividad: $h_1 = 100 \text{ m}$, $\rho_1 = 100 \text{ ohm.m}$; $h_2 = 500 \text{ m}$, $\rho_2 = 25 \text{ ohm.m}$; $\rho_3 = \infty$ (fig. 5a).

Las resistividades medias longitudinal, transversal y cuadrática del medio serán:

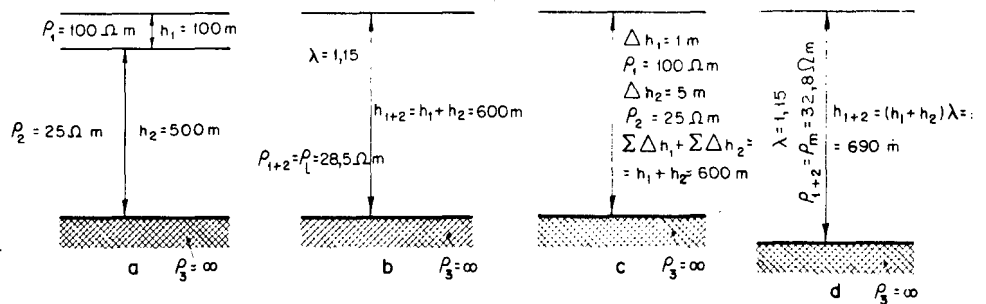
$$\rho_l = \frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2} = 28,5 \text{ ohm.m} \quad \rho_t = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2} = 37,5 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t} = 32,8 \text{ ohm.m}$$

de donde

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = 1,15$$

Fig. 5.—Casos de pseudoanisotropía y macroanisotropía, a y b-caso de pseudoanisotropía; c y d-caso de macroanisotropía (o microanisotropía cuando Δh_1 y Δh_2 son muy pequeños).



Se sabe que, sin alterar la distribución del campo eléctrico, estas dos capas, en el caso presente (cuando $\rho_3 = \infty$) se pueden sustituir por una, equivalente a dichas capas, homogénea e isotrópica de espesor $h_1 + h_2$ y resistividad ρ_l (fig. 5b). En casos semejantes esta propiedad de anisotropía del medio también se denomina pseudoanisotropía.

Si las capas del corte geoelectrico constan de varias subcapas isotrópicas y homogéneas de distintas resistividades y además el espesor de estas subcapas es tal que cada una de ellas queda reflejada en las diagramas, entonces la anisotropía de tales capas y de todo el corte se denomina macroanisotropía.

La diferencia entre la idea de pseudoanisotropía y de macroanisotropía la aclararemos con el siguiente ejemplo: supongamos que los 600 m del paquete de roca en el corte examinado anteriormente se compone de capas alternantes homogéneas e isotrópicas con espesores $\Delta h_1 = 1$ m, $\Delta h_2 = 5$ m. La resistividad de los dos grupos de subcapas alternantes es la misma que en el ejemplo anterior: $\rho_1 = 100$ ohm.m; $\rho_2 = 25$ ohm.m; $\Sigma \Delta h_1 = h_1 = 100$ m, $\Sigma \Delta h_2 = h_2 = 500$ m (fig. 5c). Determinando ρ_r , λ y los restantes parámetros obtenemos los mismos valores del ejemplo anterior. Por tanto, las relaciones h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 , en el corte quedan invariables. Pero en este ejemplo, típico de macroanisotropía, ya no se puede, sin infringir la disposición del campo eléctrico, sustituir el conjunto de las capas estratificadas alternantes, homogéneas e isotrópicas, por una capa equivalente a ellas de espesor igual a la suma de los espesores de todas esas capas. En este caso, en el sondeo eléctrico, todo el conjunto de estratos alternantes se considera como un horizonte eléctrico de resistividad $\rho_m = \lambda \cdot \rho_1$ y espesor igual a $\lambda \cdot (\Sigma \Delta h_1 + \Sigma \Delta h_2)$ (fig. 5d).

Si las capas del corte geoelectrico o las subcapas que las componen presentan lechos de distinta resistividad de tan escaso espesor (por ejemplo, arcillas pizarrosas o grafitosas, pizarras carbonosas, etc.), que no se reflejan en las diagráfias de los sondeos mecánicos y cada una de tales capas (o subcapas) queda registrada en ellas como un medio eléctricamente homogéneo, entonces la anisotropía de las capas (o subcapas) se denomina microanisotropía.

En la práctica, con frecuencia, es difícil hacer la separación entre los conceptos de macro y microanisotropía. Por ejemplo, en el caso citado en la fig. 5c, la anisotropía del medio puede denominarse macroanisotropía, pero si el espesor de las subcapas fuera mucho más pequeño y dejaran de reflejarse en las diagráfias de sondeos mecánicos, sería más exacto llamar a la anisotropía del medio como microanisotropía.

La noción de anisotropía global se introduce para las capas del corte geoelectrico que están compuestas por un conjunto de subcapas de diferente resistividad y que poseen propiedades de microanisotropía. Esta disposición es la que se suele encontrar con mayor frecuencia en la práctica.

El coeficiente de anisotropía global habitualmente es mayor que el coeficiente de microanisotropía de cada subcapa intermedia considerada separadamente. Para la misma microanisotropía de las subcapas el coeficiente de anisotropía global es igual al producto de los coeficientes de micro y macroanisotropía de las capas. El concepto de anisotropía global se extiende también a la totalidad del corte geoelectrico.

Supongamos que este corte geoelectrico se presenta como una serie de capas cada una de las cuales posee microanisotropía. Para hallar el coeficiente de anisotropía global del tramo se determinan en primer lugar los ρ_{ii} y ρ_{ij} de

cada capa. Después se calculan las resistividades medias longitudinal, transversal y cuadrática de toda la formación:

$$\rho_l = \frac{\sum_1^m h_i}{\sum_1^m \frac{h_i}{\rho_{li}}} \quad \dots \quad \rho_t = \frac{\sum_1^m h_i \rho_{ti}}{h_i} \quad \dots \quad \rho_m = \sqrt{\frac{\sum_1^m h_i \cdot \rho_{ti}}{\sum_1^m \frac{h_i}{\rho_{li}}}}$$

El coeficiente de anisotropía global del tramo será:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{\sum_1^m h_i \cdot \rho_{ti} \cdot \sum_1^m \frac{h_i}{\rho_{li}}}{\sum_1^m h_i}}$$

El valor $\sqrt{\frac{\rho_{ti}}{\rho_{li}}}$ representa el coeficiente de microanisotropía de cada una de las capas del tramo. Designemos este coeficiente mediante $\lambda_{\mu i}$:

$$\lambda_{\mu i} = \sqrt{\frac{\rho_{ti}}{\rho_{li}}} = \frac{\rho_{ti}}{\rho_{mi}} = \frac{\rho_{mi}}{\rho_{li}}$$

De aquí se deduce:

$$\rho_{ti} = \lambda_{\mu i} \cdot \rho_{mi} \quad \rho_{li} = \frac{\rho_{mi}}{\lambda_{\mu i}}$$

La expresión que representa el coeficiente de anisotropía global será, por tanto, también:

$$\lambda = \frac{\sqrt{\sum_1^m h_i \cdot \lambda_{\mu i} \cdot \rho_{mi} \cdot \sum_1^m \frac{\lambda_{\mu i} \cdot h_i}{\rho_{mi}}}}{\sum_1^m h_i}$$

Si el coeficiente $\lambda_{\mu i}$ es igual para todas las capas, entonces

$$\lambda = \lambda_{\mu i} \cdot \frac{\sqrt{\sum_1^m h_i \cdot \rho_{mi} \cdot \sum_1^m \frac{h_i}{\rho_{mi}}}}{\sum_1^m h_i} \quad (7)$$

La fracción de la parte derecha de la expresión anterior se puede considerar como la fórmula del coeficiente de macroanisotropía (λ_m) de todo el tramo. De aquí se deduce que el coeficiente de anisotropía global de la serie de capas para $\lambda_{\mu i} = \text{cte.}$ es igual al producto de los coeficientes de microanisotropía y de macroanisotropía del corte investigado.

Examinemos un ejemplo numérico de cálculo de la anisotropía global. Supongamos que la exploración eléctrica se realiza en una superficie no conductora, estratificada de dos capas del mismo espesor que en el ejemplo 5a, pero que poseen microanisotropía. Supongamos que la primera capa, de espesor $h_1 = 100$ m, se compone de subcapas homogéneas e isotropas alternantes de espesor 1 m y resistividades 200 y 50 ohm.m, y la segunda capa de espesor 500 m, de subcapas homogéneas e isotropas alternantes de espesor 0,5 m y resistividades 5 y 45 ohm.m.

Para la primera capa tenemos:

$$\rho_n = \frac{100}{0,25 + 1} = 80 \text{ ohm.m} \quad \rho_{n1} = \frac{50 \cdot 200 + 50 \cdot 50}{100} = 125 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_{m1} = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_{n1}} = 100 \text{ ohm.m} \quad \lambda_{\mu 1} = \sqrt{\frac{\rho_{n1}}{\rho_n}} = 1,25$$

Para la segunda capa:

$$\rho_n = \frac{500}{50 + 5,5} = 9 \text{ ohm.m} \quad \rho_{n2} = \frac{250 \cdot 5 + 250 \cdot 45}{500} = 25 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_{m2} = 15 \text{ ohm.m} \quad \lambda_{\mu 2} = 1,67$$

Determinemos ahora las resistividades medias longitudinal, transversal y cuadrática de todas las capas y el coeficiente de anisotropía global:

$$\rho_l = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_{n1}} + \frac{h_2}{\rho_{n2}}} = \frac{600}{56,75} = 10,6 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_t = \frac{h_1 \rho_{n1} + h_2 \rho_{n2}}{h_1 + h_2} = 42 \text{ ohm.m}$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t} = 21 \text{ ohm.m} \quad \lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = 2$$

El coeficiente de anisotropía global, como vemos, es mayor que cada uno de los coeficientes de microanisotropía de las capas tomadas aisladamente.

Para el coeficiente de macroanisotropía del corte indicado obtenemos:

$$\lambda_m = \frac{\sqrt{(h_1 \rho_{m1} + h_2 \rho_{m2}) \left(\frac{h_1}{\rho_{m1}} + \frac{h_2}{\rho_{m2}} \right)}}{h_1 + h_2} = 1,3$$

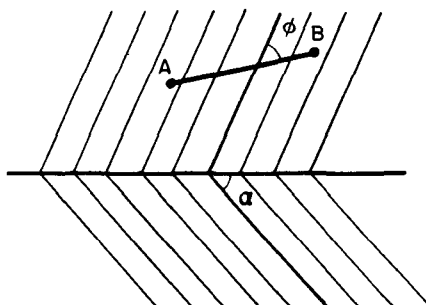
Es fácil comprobar que los valores ρ_l , ρ_t , ρ_m y λ se pueden obtener de una manera más sencilla considerando el conjunto del corte eléctrico como un todo sin pasar por la determinación de los coeficientes de microanisotropía. En la práctica, en que lo más normal es utilizar la anisotropía global, se procede habitualmente de este modo.

Imaginemos una serie compuesta de capas alternantes de relativo poco espesor y diferentes resistividades. Detengámonos sobre el interés práctico para la exploración eléctrica del fenómeno en los medios anisótropos, que se ha denominado paradoja de la anisotropía. Supongamos que el ángulo de inclinación de las capas de este medio anisótropo es igual a α (fig. 6). Se puede hallar analíticamente la expresión de la resistividad aparente $\bar{\rho}$ medida en la superficie del medio con ayuda de un dispositivo electródico formando ángulo ϕ con el rumbo de la estratificación,

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha}} \quad (8)$$

siendo ρ_m la resistividad media cuadrática del medio ($\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l}$) y λ el coeficiente de anisotropía del medio ($\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_l}$).

Fig. 6.—S.E.V. en un medio anisótropo con distribución de electrodos A B que forma ángulo ϕ con el rumbo de los estratos de buzamiento α .



De esta expresión se deduce que si los electrodos están orientados en la dirección de la estratificación ($\phi = 0$), la resistividad aparente media (que designaremos por $\bar{\rho}_t$), será $\bar{\rho}_t = \rho_m$.

Si el dispositivo está orientado normalmente a la dirección de la estratificación ($\phi = \pi/2$), entonces la resistividad aparente ($\bar{\rho}_t$) será:

$$\bar{\rho}_t = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \text{sen}^2 \alpha}}$$

Como la expresión $\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \text{sen}^2 \alpha}$ es mayor que 1 en todos los casos, salvo en el caso de $\alpha = 0$ en que es igual a 1, $\bar{\rho}_t > \rho_m$.

Es decir, la resistividad aparente medida paralelamente a la estratificación de las rocas anisótropas es mayor que la medida normalmente a dicha estratificación. Pero sabemos que la resistividad verdadera del medio anisótropo ρ_l , cuando la corriente se transmite a lo largo de la estratificación es menor que la resistencia verdadera cuando la corriente se envía perpendicularmente a ella, es decir, que $\rho_l < \rho_t$. Este resultado obtenido se denomina paradoja de anisotropía.

Indicaremos que si las capas yacen estratificadas verticalmente ($\alpha + 90^\circ$) entonces,

$$\bar{\rho}_t = \frac{\rho_m}{\lambda} = \rho_l$$

Por consiguiente, cuando el dispositivo está situado perpendicularmente a la estratificación del conjunto de capas verticales, la resistividad aparente es igual a la resistividad media longitudinal del mismo.

Es fácil ver que para $\alpha = 0$, es decir, cuando la estratificación es horizontal, la resistividad aparente del conjunto es igual a la resistividad media cuadrática (ρ_m) del medio anisótropo.

3. Las diagrfías de sondeos mecánicos en la determinación de los parámetros del corte geoelectrico

Las resistividades medias y los coeficientes de anisotropía de las capas del corte se pueden obtener con ayuda de las diagrfías eléctricas efectuadas en los sondeos mecánicos, así como de las curvas de SEV hechas en el entorno de los mismos. Estas curvas de SEV se llaman paramétricas, porque con su ayuda y de los resultados de los sondeos mecánicos se determinan los parámetros eléctricos del corte, que son necesarios para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV.

Determinaremos la conductancia total, resistividades medias y coeficientes de anisotropía de las capas del corte eléctrico por los resultados obtenidos en los sondeos mecánicos, sin abordar por ahora, el uso de las curvas paramétricas de SEV.

Para el cálculo de los parámetros indicados, lo mejor es hacer uso de los resultados obtenidos con la sonda lateral focalizada (STL), porque con ella se obtienen con mayor exactitud los valores de las resistividades de las capas. Sin embargo, el STL no se utiliza en todas partes ni a lo largo de todos los pozos. Por ello normalmente, hay que utilizar la diagrfía realizada con la sonda habitual en cada región.

Es necesario, sin embargo, tener en cuenta que los datos obtenidos en la testificación sobre la resistividad aparente depende no sólo de la resistividad verdadera del terreno y del espesor de las capas, sino también del tipo de sonda empleada, sus medidas, resistividad del lodo de perforación, del diámetro del pozo y del grado de penetración del lodo en el terreno.

Por ejemplo, en la perforación de sales halógenas, calizas y otras rocas de resistividad alta, las diagrfías obtenidas incluso con sonda de gradiente, a causa de la influencia de los lodos de perforación conductores, se obtienen valores de $\bar{\rho}$, a veces, fuertemente disminuidos respecto a la verdadera resistividad de la roca. Por ello no se puede establecer una coincidencia perfecta entre los resultados de los parámetros incógnitos obtenidos por las diagrfías con los valores verdaderos de dichos parámetros. Los resultados de la interpretación dan tan sólo una idea general, a veces incluso no muy exacta, de las particularidades del corte. Sin embargo, incluso tal idea aproximada es muy útil para el análisis de las curvas de SEV y su interpretación cuantitativa.

Las particularidades de los diversos dispositivos con que se realizan las mediciones eléctricas en los sondeos, no son tenidas en cuenta a veces por el interpretador, lo que lleva a una valoración errónea de los parámetros del corte geoelectrico. La sonda normal de potencial, por ejemplo, da valores rebajados de $\bar{\rho}$ en la investigación de capas de resistividad alta en sondeos con soluciones de perforación salobres. También se ha comprobado que en el caso de rocas permeables y presencia de lodos dulces en el sondeo —caso de arenas y areniscas saturadas fuertemente de aguas mineralizadas— se indican frecuentemente en la testificación mediante la sonda de potencial normal valores

aumentados de la resistividad a causa de la influencia de la penetración de la solución dulce en dichas rocas.

Las indicaciones de la sonda normal de gradiente, a causa de su longitud (AO) mucho mayor con relación al diámetro de perforación, que la longitud (AM) de la sonda de potencial están menos expuestas a la influencia de los lodos de perforación. Pero también esta sonda, como ya se ha indicado, da valores rebajados de $\bar{\rho}$ en rocas de resistividad alta, especialmente en caso de mineralización fuerte del lodo de perforación. No obstante, S , $\bar{\rho}$, λ y otros parámetros se calculan solamente por las diagráfias obtenidas con la sonda de gradiente con separaciones grandes. Las magnitudes incógnitas calculadas con ayuda de estos diagramas son los más próximos a los valores que se obtienen por el cálculo mediante los STL (sondeos de testificación lateral focalizada).

Para la división del corte en capas individualizadas y determinación de sus límites, se usa la metodología habitual, aceptada en la práctica de los trabajos de testificación, utilizando los diagramas de PS. Para el caso de una más exacta delimitación de las capas, se utilizan también las diagráfias obtenidas con la sonda de potencial de pequeñas dimensiones.

Si en la diagráfia, alguna de las capas queda representada por una línea prácticamente recta, entonces puede suponerse que corresponde a una roca eléctricamente homogénea e isótropa u homogénea desde el punto de vista eléctrico con propiedades microanisótropas.

En el primer caso, la línea recta $\bar{\rho}$ de la diagráfia indica la resistividad verdadera de la roca. En el segundo caso, el valor obtenido de $\bar{\rho}$, a causa de la paradoja de anisotropía, corresponderá a la resistividad media longitudinal ρ_l de la capa, ya que el dispositivo de la testificación está dispuesto perpendicularmente al plano de estratificación. El valor de la resistividad media transversal de la capa y el coeficiente de microanisotropía no es posible hallarlos en esta disposición por los datos de la testificación.

Para la interpretación de las diagráfias el corte se divide en horizontes complejos separados, para los que se calculan los valores de las resistividades medias (ρ_l , ρ_t , ρ_m) y el coeficiente de macroanisotropía. El resultado se obtiene por las fórmulas citadas más arriba. La interpretación de los datos de la testificación, como se deduce de lo expuesto, conduce al cálculo más verosímil de la magnitud ρ_l de cada capa en particular y de todo el corte en conjunto.

Las diagráfias en el intervalo sujeto a estudio, esquematizan algo el corte eléctrico, obteniéndose un número de capas de diferentes espesores con valores $\bar{\rho}$ aproximadamente iguales dentro del límite de cada capa. (Fig. 7.)

El número de orden de cada capa, su espesor y resistividad, obtenidos con diagramas de testificación, se incluyen en la tabla 1.

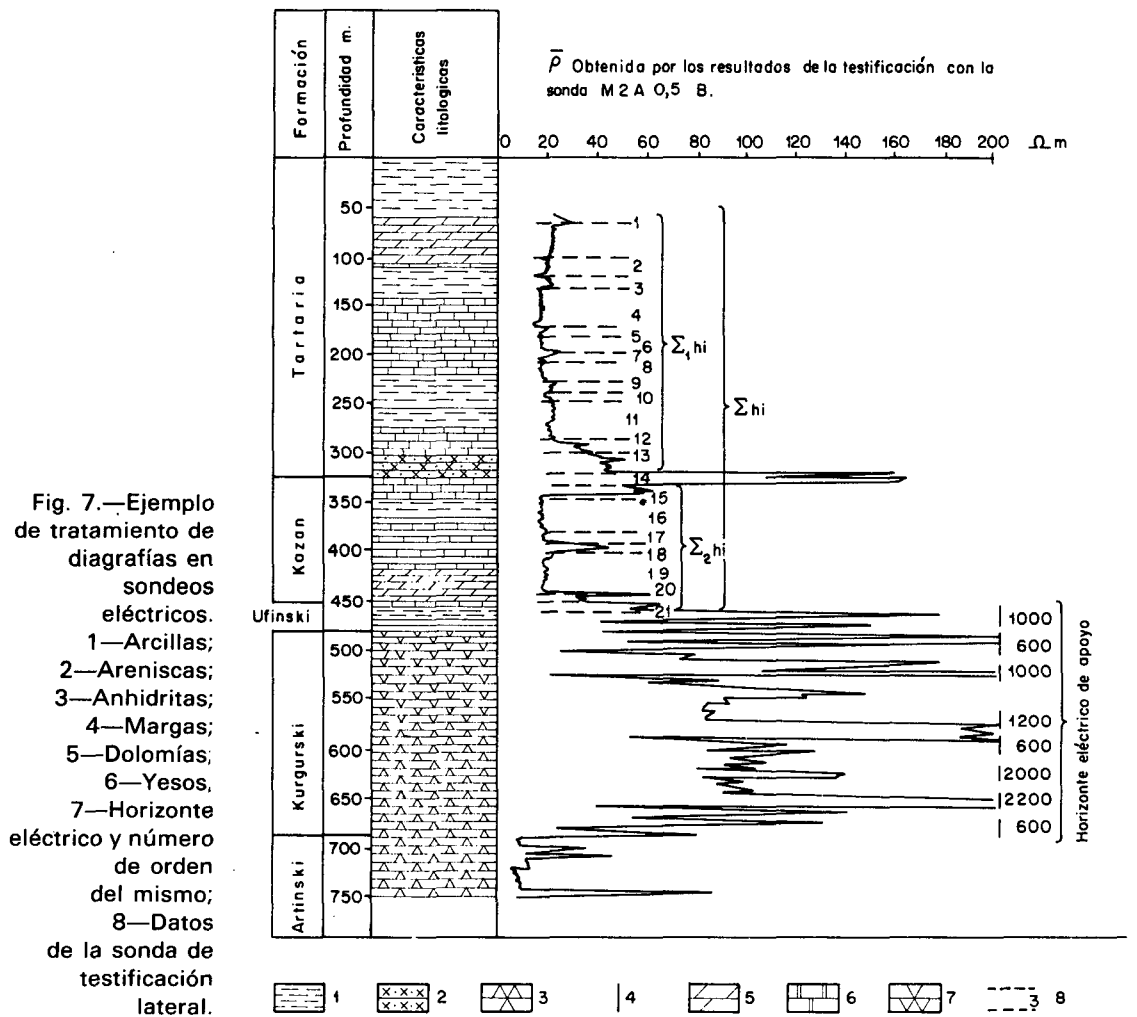


TABLA 1

FORMATO PARA ANOTACION DE RESULTADOS DE DIAGRFIAS EN SONDEOS MECANICOS

N.º de orden	Espesor h_i (m)	Resistividad ρ_i ($\Omega \cdot m$)	Resistencia transversal total $T_i = h_i \cdot \rho_i$	Conductancia longitudinal total $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$	Resist. medias ρ_r, ρ_t, ρ_m	Cofic. de anisotropía λ
1 2 3 etc.						
	$\Sigma h_i =$		$\Sigma T_i =$	$\Sigma S_i =$	$\rho_i =$ $\rho_t =$ $\rho_m =$	

Realizado el cálculo, se determinan los parámetros incógnita para cada serie de capas y para todo el paquete que yace, sobre el horizonte de apoyo.

Algunas de estas capas o incluso todas pueden tener, además de propiedades macroanisótropas, las de microanisotropía, que no se encuentran reflejadas en la curva $\bar{\rho}$. Las diagragías se tratan también en este caso igual que se ha indicado anteriormente. Sin embargo, con ello se introducen inevitablemente errores de principio en el cálculo de las resistividades medias ρ_t , ρ_m y coeficiente de anisotropía. Por la misma causa, por el aspecto de la curva en el intervalo que presenta resistividad constante, no es posible decir si la misma corresponde a la resistividad de una capa homogénea e isotropa o a una capa con propiedades microanisótropas. En este último caso, como sabemos, no es posible calcular ρ_t . Tomando en la interpretación, como es costumbre, para cada capa el valor $\rho_i = \rho_{ii}$, en el caso de capas microanisótropas, en el cálculo $T_i = h_i \cdot \rho_{ii}$ se comete un error a causa de que en la expresión para T_i en lugar

de ρ_{ii} se utiliza $\rho_{ii} = \frac{\rho_i}{\lambda_{\mu}^2}$ siendo λ_{μ} el coeficiente de microanisotropía de la capa i . La resistividad transversal de la capa resulta por consiguiente λ_{μ} veces menor que la real. De aquí que también el valor de la resistividad media transversal ρ_t calculado como $\frac{\sum h_i \rho_{ii}}{\sum h_i}$ para todo el complejo de capas examinadas, será también menor que el verdadero. El valor λ , calculado como $\sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_i}}$ resulta en este caso no el coeficiente de anisotropía global, sino sólo el coeficiente de macroanisotropía, es decir, también resulta disminuido en comparación con el verdadero.

Por consiguiente, si el corte estudiado está compuesto por un complejo de rocas en el que entran capas anisótropas con propiedades de microanisotropía entonces, utilizando los resultados de la testificación, se puede calcular con certeza sólo la resistividad media longitudinal de dicho complejo. Los valores de ρ_t , ρ_m y λ , obtenidos mediante el cálculo habitual por los diagramas de la testificación serán notoriamente erróneos en el sentido de disminuir estas magnitudes, estando vinculado ello a la imposibilidad de calcular la influencia de la microanisotropía de las rocas.

El papel de las SEV paramétricas, que ayudan a la solución del último problema, se verá más adelante.

4. Definición de la curva de SEV. Utilización de la escala logarítmica en la representación gráfica

La exploración eléctrica mediante SEV, como ya sabemos, consiste en estudiar el cambio de la resistividad aparente $\bar{\rho}$ con la separación progresiva de los electrodos A y B de corriente. Este cambio de $\bar{\rho}$ depende de la distancia entre los electrodos A y B, de los cambios de la resistividad verdadera del terreno y del espesor de las capas exploradas en el corte geoelectrico. Conociendo el carácter del cambio de $\bar{\rho}$ con el aumento de distancia entre los electrodos A y B en el punto que exploramos y la resistividad verdadera de las capas del corte, se puede determinar la profundidad de la estratificación sobre el horizonte de apoyo.

Relacionar teóricamente la resistividad aparente con el valor de la separación AB es una tarea muy compleja y ello sólo se ha conseguido en algunos casos idealizados del corte geoelectrico.

En particular este problema está resuelto para cualquier número de capas n en el caso de que sean homogéneas, ilimitadas en su extensión lateral y estratificadas horizontalmente. La solución de este problema, de planteamiento ideal, es importante. Permite dar una orientación en la interpretación de cortes geoelectricos más complicados (capas limitadas, con estratificación inclinada, etc.) que generalmente se encuentran en la práctica.

Esta solución, como ya sabemos, se representa por una serie infinita.

$$\bar{\rho} = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cdot f_n \left(\frac{AB}{2} \right) \right]$$

donde ρ_1 es la resistividad de la primera capa superior; q_n es una función de la relación entre la resistividad y el espesor de las capas del corte; $f_n (AB/2)$ es una función que depende sólo de las medidas del dispositivo de alimentación y del número de orden (n) del miembro de la serie infinita; en cuanto a MN se supone infinitamente pequeño.

En el caso más sencillo de corte, el compuesto por dos capas, la superior de espesor h_1 y resistividad ρ_1 y la inferior de espesor infinitamente grande y resistividad ρ_2 , la solución viene dada por la expresión

$$\bar{\rho} = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \left(\frac{AB}{2h_1} \right)^3}{\left[\left(\frac{AB}{2h_1} \right)^2 + 4n^2 \right]^{3/2}} \right] \quad (9)$$

en la que K_{12} designa la relación entre la diferencia y la suma de las resistividades de las dos capas,

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\rho_2/\rho_1 - 1}{\rho_2/\rho_1 + 1}$$

K_{12} varía entre los límites $+1$ (cuando $\rho_2 = \infty$) y -1 (cuando $\rho_2 = 0$). Si en el eje de abscisas se indica el valor $AB/2$ y en ordenadas $\bar{\rho}$, la curva resultante representa la relación (9) que existe entre los valores de las resistividades aparentes y las correspondientes semiseparaciones del dispositivo electrónico. Tales gráficas se denominan curvas de SEV. Los valores de $AB/2$ y $\bar{\rho}$ se representan siempre en un sistema de coordenadas a escala bilogarítmica.

Examinemos la ecuación (9). Si consideramos $\rho_2 = \rho_1$, el corte estratigráfico se transforma en un medio homogéneo de espesor infinitamente grande y resistividad ρ_1 . Entonces, de acuerdo con (9), $\bar{\rho} = \rho_1$, pues K_{12} se hace igual a cero. La resistividad aparente medida en este caso, no dependerá de la

distancia entre los electrodos A y B. El gráfico de SEV representará una recta paralela al eje de abcisas.

La expresión (9) nos indica que para separaciones $AB/2$ pequeñas en comparación con h_1 , $\bar{\rho}$ se diferencia poco de ρ_1 :

$$\lim_{\frac{AB}{2} \rightarrow 0} \bar{\rho} = \rho_1$$

Efectivamente, la rama inicial de la curva de SEV, cuando $\frac{AB}{2} \rightarrow 0$ se inclina asintóticamente hacia la recta $\bar{\rho} = \rho_1$.

Veamos cómo se comporta la curva de SEV en el caso analizado de corte de dos capas, al aumentar ilimitadamente la separación entre los electrodos A y B. Es fácil ver que entonces el segundo miembro de la fórmula (9), al ser $\frac{AB}{2} \rightarrow \infty$, tiende a K_{12}^n .

$$\lim_{\frac{AB}{2} \rightarrow \infty} \bar{\rho} = \rho_1 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \right) = \rho_1 [1 + 2 (K_{12} + K_{12}^2 + K_{12}^3 + \dots)]$$

De ello se concluye, puesto que K_{12} tiene un valor absoluto menor que la unidad, que la expresión entre paréntesis es la suma de una progresión geométrica cuyo valor es finito y, por tanto:

$$\lim_{\frac{AB}{2} \rightarrow \infty} \bar{\rho} = \rho_1 \left(1 + \frac{2K_{12}}{1-K_{12}} \right) = \rho_2$$

Es decir, que el valor de la resistividad aparente, al aumentar infinitamente la separación entre los electrodos, coincide, en el límite, con la resistividad verdadera de la capa inferior. Esta conclusión se extiende al caso de un corte geoelectrico de múltiples capas. La rama de la curva de SEV correspondiente a un corte de cualquier número de capas se aproxima, al aumentar AB , a una recta, paralela al eje de abcisas, $\bar{\rho} = \rho_n$, siendo ρ_n la resistividad verdadera de la capa n (el horizonte eléctrico de apoyo). Esto es válido para todos los valores de ρ_n , excepto para $\rho_n = \infty$ y $\rho_n = 0$.

Como hemos indicado anteriormente, las curvas de SEV siempre se representan a escala logarítmica. Veamos sus ventajas respecto a la escala aritmética.

Examinemos de nuevo la expresión (9) de la resistividad aparente para el caso del corte de dos capas eléctricas. La parte derecha de esta expresión, cuando es constante K_{12} , es decir, cuando es fija la relación ρ_2/ρ_1 , se puede poner en forma de producto de dos factores (15):

$$\bar{\rho} = \rho_1 \cdot f\left(\frac{AB}{2h_1}\right)$$

de los que el segundo depende sólo de la relación de la semiseparación de electrodos $AB/2$ al espesor h_1 . Si representamos esta ecuación en un sistema de coordenadas a escala aritmética, llevando al eje de abscisas los valores $AB/2 h_1$, entonces, con la misma h_1 , se obtienen distintas curvas para distintos ρ_1 .

Tomando logaritmos en la expresión anterior podemos transformar este producto de dos funciones en una suma,

$$\log \bar{\rho} = \log \rho_1 + \log f\left(\frac{AB}{2h_1}\right)$$

En la práctica esto se consigue llevando los valores de $\bar{\rho}$ en un eje de ordenadas a escala logarítmica. Entonces, al variar ρ_1 , permaneciendo constante ρ_2/ρ_1 , obtendremos siempre la misma curva, que sólo resultará desplazada paralelamente al eje de ordenadas. De este modo se elimina la influencia de ρ_1 en la forma de la curva.

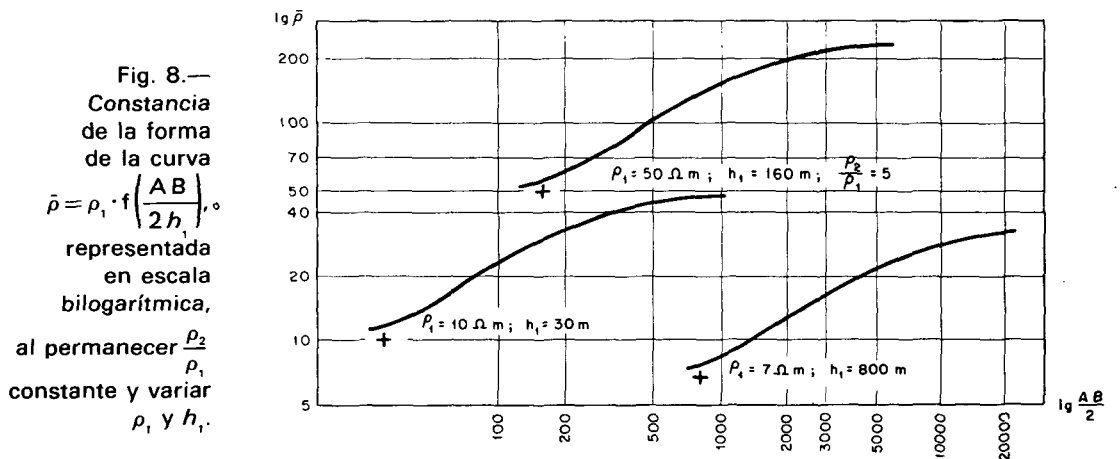
También se puede eliminar, en la forma de la curva, la influencia de h_1 . Para ello tan sólo es preciso hacer depender $\log \bar{\rho}$, no de una función de $AB/2h_1$, sino de una función de $\log \frac{AB}{2h_1}$, es decir, presentar la ecuación (9) de la curva en la forma siguiente

$$\log \bar{\rho} = \log \rho_1 + \log F\left(\log \frac{AB}{2} - \log h_1\right) \quad (10)$$

o también,

$$\log \frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = \log F\left(\log \frac{AB}{2h_1}\right)$$

Llevando a un sistema de coordenadas con escala logarítmica los valores de $\bar{\rho}$ y $AB/2$, la curva obtenida conserva la misma forma, con independencia de los valores de ρ_1 y h_1 , si permanece constante K_{12} , es decir, ρ_2/ρ_1 . Las variaciones de ρ_1 desplazarán la curva en el papel logarítmico doble hacia arriba o hacia abajo paralelamente al eje de ordenadas y las variaciones de h_1 , a la derecha o a la izquierda paralelamente al eje de abscisas (fig. 8).



Por tanto, la forma de la curva de SEV no depende de los valores de la resistividad y espesor de la primera capa del corte eléctrico, cuando ρ_2/ρ_1 es constante, siendo ventajosa la representación de tales curvas a escala bilogarítmica. Esto ocurre no sólo para el caso de dos capas, sino también para el caso de mayor número de capas.

Si en un corte de n capas las relaciones $\rho_2/\rho_1, \rho_3/\rho_1, \dots, \rho_n/\rho_1$ y $h_2/h_1, h_3/h_1, \dots, h_{n-1}/h_1$ son constantes, entonces, cualquiera que sea la variación de los valores de ρ_1 y h_1 , la curva que relaciona $\bar{\rho}$ con $AB/2$, representada a escala bilogarítmica, no cambiará de forma, limitándose a trasladarse paralelamente a sí misma respecto a los ejes coordenados, al variar ρ_1 y h_1 .

La construcción de las curvas de SEV a escala bilogarítmica no cambia los razonamientos expresados anteriormente para las asíntotas de las ramas inicial y final de la curva de SEV. En su expresión logarítmica la ecuación (9) tendrá la siguiente forma

$$\log \bar{\rho} = \log \rho_1 + \log \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \left(\frac{AB}{2h_1} \right)^3}{\left[\left(\frac{AB}{2h_1} \right)^2 + 4n^2 \right]^{3/2}} \right]$$

Cuanto menor sea $AB/2$, tanto menor será la suma del segundo sumando de la fórmula entre paréntesis. Cuando $AB/2 \rightarrow 0$ esta suma se reduce a cero y resulta

$$\log \bar{\rho} = \log \rho_1 + \log 1 = \log \rho_1 \quad (11)$$

Es decir, la rama inicial de la curva $\log \bar{\rho}$ se aproxima asintóticamente a una recta, paralela al eje de abscisas, que está a distancia de él igual a $\log \rho_1$.

Si $AB/2 \rightarrow \infty$, es fácil demostrar que $\log \bar{\rho}$, en el límite, se diferenciará muy poco de $\log \rho_2$, es decir, la rama asintótica final de la curva de SEV en dos capas, es una recta paralela al eje de abscisas y a distancia de él igual a $\log \rho_2$. En otras palabras, en el caso del corte eléctrico de dos capas, cuando la separación de electrodos AB va aumentando, el valor de $\bar{\rho}$ tiende a acercarse al valor de ρ_2 (resistividad verdadera del medio estratificado inferior). Se puede demostrar que en el caso de cualquier número n de capas, la rama final de la curva tenderá asintóticamente a una recta, paralela al eje de abscisas, de ordenada $\log \rho_n$.

Cuanto mayor sea el valor de ρ_n (resistividad del medio infrayacente), tanto más alta quedará la asíntota de la rama final de la curva $\log \bar{\rho}$, para $\log \frac{AB}{2} \rightarrow \infty$.

Veamos qué aspecto tendrá la rama final de la curva de SEV (para $AB/2 \rightarrow \infty$), si el medio infrayacente, por ejemplo, en el corte de dos capas, tiene una resistividad infinitamente grande ($\rho_2 = \infty$). En este caso especial las líneas de corriente, si hay una gran distancia entre los electrodos de alimentación

AB, están dirigidas paralelamente a la superficie aislante, distribuyéndose tan sólo en la capa superior (espesor h_1 y resistividad ρ_1). La resistividad aparente se obtendrá de la fórmula siguiente que la relaciona con la separación de electrodos:

$$\bar{\rho} = \rho_1 \cdot \frac{AB}{2h_1} \quad (12)$$

ó

$$\log \bar{\rho} = \log \frac{AB}{2} + \log \frac{\rho_1}{h_1} \quad (13)$$

Esta ecuación, para un sistema de coordenadas en el que al eje de las x se lleve $\log (AB/2)$ y al eje de las y, $\log \bar{\rho}$, representa una recta de pendiente angular igual a la unidad, es decir, inclinada un ángulo de 45° con los ejes coordenados. Se puede llegar a una fórmula análoga en el caso de que el corte eléctrico se componga de cualquier número, n , de capas horizontales y de distinta resistividad, si la enésima capa es aislante ($\rho_n = \infty$). Es fácil verlo, sustituyendo en la ecuación (12), ρ_1 por ρ_l resistividad media longitudinal del corte de $n-1$ capas y h_1 por H , espesor suma de los espesores de las $n-1$ primeras capas.

De este modo hemos llegado a una conclusión que tiene gran importancia en la teoría y práctica de la interpretación de las curvas de SEV. En un sistema de coordenadas a escala bilogarítmica, la curva que relaciona $\bar{\rho}$ con $AB/2$, en el caso de cualquier número de capas n no confinadas lateralmente y dispuestas horizontales, al hacerse la semiseparación de electrodos $AB/2$ muy grande y siempre que $\rho_n = \infty$, degenera en una recta inclinada 45° con los ejes coordenados.

Busquemos el punto de intersección de esta recta con la asíntota de la rama inicial de la curva de SEV en el caso del corte de dos capas. Resolviendo el sistema de ecuaciones (11) y (13), de ambas rectas, obtendremos,

$$\log \bar{\rho} = \log \rho_1 = \log \frac{AB}{2} + \log \frac{\rho_1}{h_1}$$

De aquí,

$$\log \frac{AB}{2} = \log h_1$$

o también

$$AB/2 = h_1$$

Es decir, que en caso de ser $\rho_2 = \infty$, la abcisa del punto de intersección de la asíntota inicial y de la asíntota final de la curva de SEV, en el corte de dos capas, es igual al espesor de la capa que yace sobre el horizonte de apoyo.

Para el caso de n capas, con $\rho_n = \infty$, la abcisa del punto de intersección de la rama final asintótica de la curva de SEV, con la recta $\log \bar{\rho} = \log \rho_n$, es igual al espesor total H del

conjunto de capas que descansa sobre el horizonte de apoyo ($\rho_n = \infty$).

Hallemos ahora, para el mismo corte de dos capas con $\rho_2 = \infty$, punto de intersección de la asíntota de la rama final de la curva de SEV con el eje de abcisas ($\log \bar{\rho} = 0$).

Es fácil ver que esto se cumple cuando

$$\log \frac{AB}{2} = \log \frac{h_1}{\rho_1}$$

de donde

$$AB/2 = h_1/\rho_1$$

Por tanto, la asíntota de la rama final de la curva de SEV corta al eje de abcisas ($\log \bar{\rho} = 0$, o sea, $\bar{\rho} = 1$) en el punto del gráfico cuya abcisa es igual a la relación entre el espesor h_1 y la resistividad ρ_1 de la primera capa, es decir, es igual a la conductancia longitudinal S de la capa que descansa sobre el horizonte de apoyo.

Si en vez de dos capas consideramos el corte de n capas, en el que $\rho_n = \infty$, entonces sustituyendo ρ_1 por ρ , y h_1 por H , siendo la resistividad media longitudinal de la totalidad de las capas eléctricas que descansan sobre el medio de resistividad infinita y H el espesor de estas $n-1$ capas, obtendremos:

$$AB/2 = H/\rho,$$

o, según las expresiones (3) y (4):

$$AB/2 = S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + \dots + h_{n-1}/\rho_{n-1} \quad (14)$$

es decir, la rama asíntótica final de la curva de SEV, en el caso de un corte de n capas, para $\rho_n = \infty$, corta al eje de abcisas del gráfico de SEV en un punto cuya abcisa es la suma de las conductancias longitudinales S de las capas que descansan sobre el horizonte eléctrico de apoyo. Es fácil observar, de la expresión (12), que el valor de S puede ponerse de forma sencilla mediante las coordenadas ($AB/2$, $\bar{\rho}$) de puntos situados en la rama asíntótica de la curva,

$$S = AB/2 \bar{\rho} \quad (15)$$

Se recomienda utilizar siempre esta expresión para una mejor determinación de S mediante las curvas de SEV. El valor de $\bar{\rho}$ correspondiente a la semiseparación $AB/2$ hay que tomarlo de la libreta de campo.

Obtenida la curva de SEV mediante las mediciones de campo, no se conoce ρ_1 ni h_1 . En una hoja transparente (impreso de SEV) graduada a escala bilogarítmica, se dibuja la curva que relaciona $\bar{\rho}$ con $AB/2$. En el eje de abcisas se señalan los valores de la semiseparación de electrodos de corriente $AB/2$ y en el eje de ordenadas los correspondientes de $\bar{\rho}$. Teniendo en cuenta que se dibuja a escala logarítmica, no es difícil

deducir que, con esta construcción, se obtiene la curva de SEV,

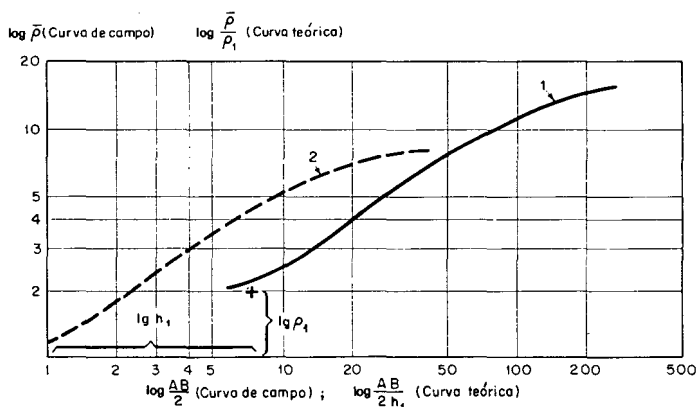
$$\log \bar{\rho} = \log F\left(\log \frac{AB}{2}\right) \quad (16)$$

Si comparamos entre sí las ecuaciones (10) y (16), se observa que la curva práctica de SEV tiene que desplazarse, con relación a la curva representada en (10), a la derecha o a la izquierda un valor igual a $\log h_1$ y hacia arriba o hacia abajo un valor igual a $\log \rho_1$.

Mediante la ecuación (10) se construyen curvas con las que, por superposición, se comparan las curvas prácticas de SEV para la determinación de los parámetros de las capas estudiadas en el corte eléctrico. Cuando calculamos las curvas teóricas de SEV se toman h_1 y ρ_1 con valores iguales a la unidad. Por ello, al representar estas curvas gráficamente, se toman como valores en los ejes de abscisas y ordenadas $AB/2h_1$ y ρ/ρ_1 .

En la figura 9, a modo de ejemplo, se ha representado la curva práctica de SEV para el caso de corte de dos capas en el que $h_1 = 8$ m, $\rho_1 = 2$ ohm.m y $\rho_2/\rho_1 = 9$. La curva teórica de SEV para la misma relación ρ_2/ρ_1 está señalada de puntos. Por las condiciones de formación de la curva teórica de SEV, para el valor dado de ρ_2/ρ_1 , la misma ocupará una posición invariable en el impreso y tendrá una forma fija cualquiera que sean h_1 y ρ_1 .

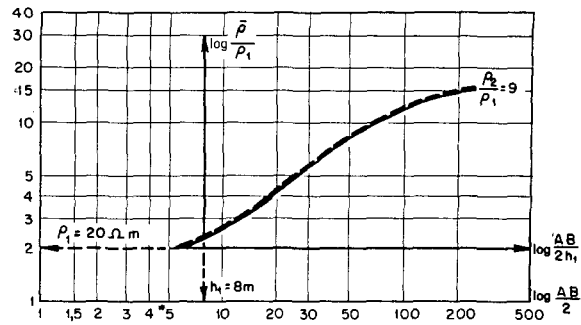
Fig. 9.—
Desplazamiento de la curva de campo de SEV respecto a la del ábaco variando los valores $\log h_1$ (a la derecha o la izquierda) y $\log \rho_1$ (hacia arriba o hacia abajo).
1—Curva de campo de SEV para el caso $\rho_1 = 2 \Omega m$; $h_1 = 8$ m; $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 9$;
2—Curva teórica de SEV para el mismo caso.



Para que las dos curvas coincidan entre sí, el impreso en que se señala la curva práctica de SEV hay que trasladarlo en el presente caso hacia abajo y hacia la izquierda los valores $\rho_1 = 2$ ohm.m y $h_1 = 8$ m sobre el impreso de la curva teórica con relación a los ejes coordenados de ésta. Entonces (fig. 10), el eje de ordenadas de esta última cortará al eje de abscisas señalado en el impreso de la curva práctica de SEV en el punto en que $\log AB/2$ es igual a $\log h_1$. De ello se deduce que $h_1 = AB/2$ en metros.

El eje de abscisas de la curva teórica cortará al eje de ordenadas del impreso de la curva práctica en el punto en que $\log \bar{\rho} = \log \rho_1$ y de aquí, $\bar{\rho} = \rho_1$ en ohm.m.

Fig. 10.—
Situación de
los ejes de
coordenadas
del ábaco y de la
curva de campo
de SEV en el
caso de
interpretación de
esta última
mediante
superposición
con la primera.



Por tanto, la utilización de la escala logarítmica permite, mediante la coincidencia de las curvas teórica y práctica, determinar los valores de h_1 y de ρ_1 .

De modo análogo se pueden determinar los parámetros de las capas en cortes eléctricos más complejos.

Existe gran número de curvas calculadas de SEV para el corte de dos capas con distintos valores de ρ_2/ρ_1 . Todas ellas, construidas como se ha indicado anteriormente y reunidas en dos impresos (para $\rho_2 > \rho_1$ y $\rho_2 < \rho_1$) denominados ábacos.

Del mismo modo se han calculado y construido gran cantidad de curvas de SEV para el corte de tres capas, con valores diversos de h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 .

Hay también ábacos para el corte de cuatro capas con diversas relaciones entre los parámetros. Todas las curvas teóricas están representadas en la misma escala logarítmica que el impreso transparente en que se dibujan las curvas prácticas de SEV, con longitud de unidad logarítmica (o módulo de escala) igual a 62,5 mm.

5. Tipos de curvas de SEV

En función del número de capas del corte, se reúnen las curvas teóricas de SEV, en ábacos de dos, tres, cuatro capas, etc.

En las curvas de SEV se reflejan algunas de las capas eléctricamente diferentes, pero ello no quiere decir que el corte geoelectrónico se componga precisamente de ese número de capas. Con frecuencia ocurre que las capas de poco espesor y profundas o que no se distinguen claramente por su resistividad de las contiguas no quedan reflejadas en las curvas de SEV. Por ello, en general, no se puede valorar por el corte geoelectrónico el número efectivo de capas que hemos explorado. Así y todo, la subdivisión nos facilita el problema de la interpretación. Cuando estudiamos un caso determinado suponemos que el número de capas del corte es el que se señala gráficamente en la curva de SEV correspondiente.

En el estudio del corte de dos capas y según que sea mayor o menor la resistividad verdadera ρ_2 que la ρ_1 de la capa superior, se encuentran curvas de SEV de dos tipos (figs. 11 a y 11 b). En los ejes coordenados, y para mayor brevedad, se

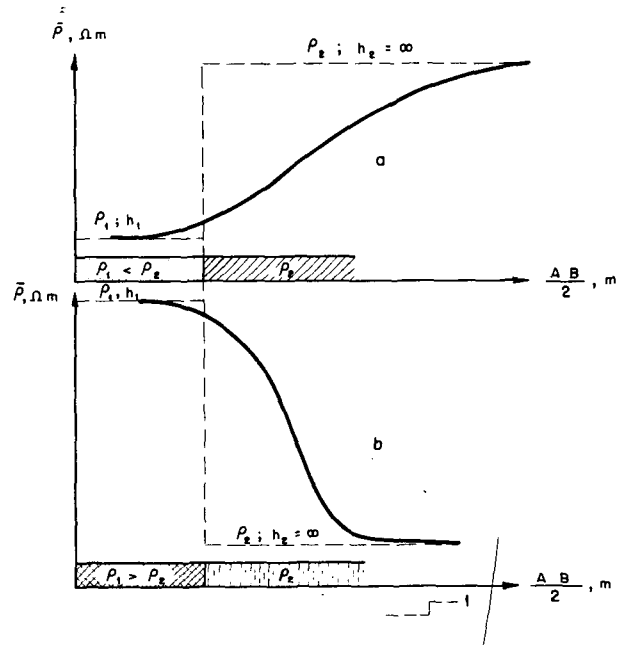


Fig. 11.—Tipos de curvas de SEV de dos capas. 1—Gráfica de resistividades verdaderas de las capas.

suprime el símbolo log. y en lugar de $\log \frac{AB}{2}$ y $\log \bar{\rho}$, se pondrá $AB/2$ y $\bar{\rho}$.

Si a las dos capas del corte eléctrico se le añade una tercera, podemos encontrar cuatro relaciones entre las resistividades verdaderas de las capas (tabla 2).

TABLA 2

TIPOS DE CURVAS DE SEV PARA EL CORTE DE TRES CAPAS

Relación entre las resistividades verdaderas de las capas	Designación de las curvas de SEV	Relación entre las resistividades verdaderas de las capas	Designación de las curvas de SEV
$\rho_1 > \rho_2; \rho_2 < \rho_3$	H	$\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3$	K
$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	Q	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	A

En relación con esto se observan curvas de SEV de tres capas de cuatro tipos diferentes (fig. 12) denominados abreviadamente H, Q, K y A. El significado de estos símbolos se comprenderá en las páginas que siguen.

Si tenemos un corte eléctrico de cuatro capas, vemos que pueden existir ya ocho combinaciones entre los valores de las resistividades de las capas contiguas (tabla 3).

Conforme con ello, en la práctica se pueden encontrar ocho tipos de curvas de cuatro capas de SEV. Estos se designan por HA, HK, QH, QQ, KH, KQ, AA y AK (figs. 13 y 14).

TABLA 3

TIPOS DE CURVAS DE SEV PARA EL CORTE DE CUATRO CAPAS

Relación entre las resistividades verdaderas de las capas	Designación de las curvas de SEV	Relación entre las resistividades verdaderas de las capas	Designación de las curvas de SEV
$\rho_1 > \rho_2; \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	HA	$\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3; \rho_3 < \rho_4$	KH
$\rho_1 > \rho_2; \rho_2 < \rho_3; \rho_3 > \rho_4$	HK	$\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	KQ
$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3; \rho_3 < \rho_4$	QH	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	AA
$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	QQ	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3; \rho_3 > \rho_4$	AK

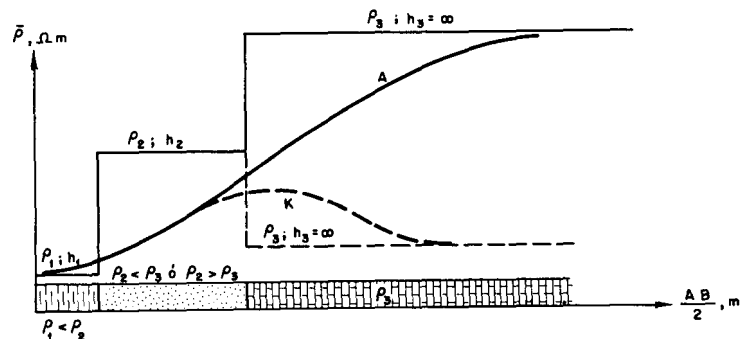
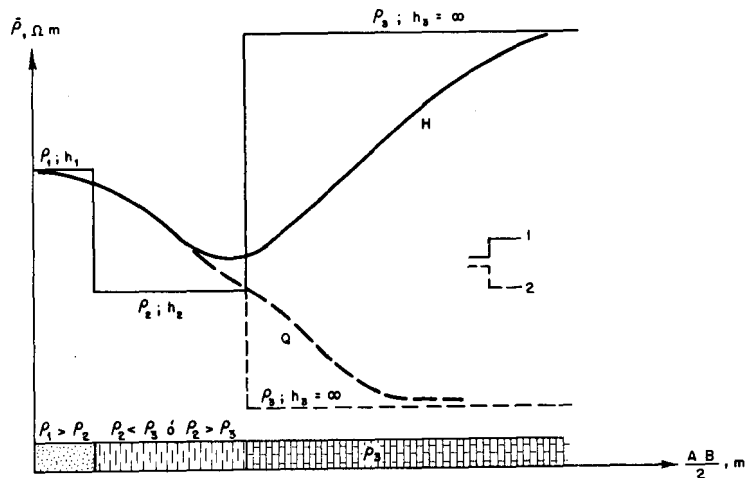


Fig. 12.—Tipos de curvas de SEV de tres capas.
1.2—Gráficas de espesores y resistividades verdaderas de las capas.

En el corte eléctrico de cinco capas, se obtienen dieciséis tipos de curvas de SEV, para seis capas, existen treinta y dos tipos, etc.

En el terreno que se investiga mediante la variación de la resistividad y, sobre todo, en las capas superiores del corte se pueden obtener las más diversas curvas de SEV. En algunos casos, en la zona de exploración todas las curvas son del mismo tipo. Sin embargo, es más frecuente que las curvas de SEV se modifiquen pasando de un tipo a otro en relativamente poca distancia.

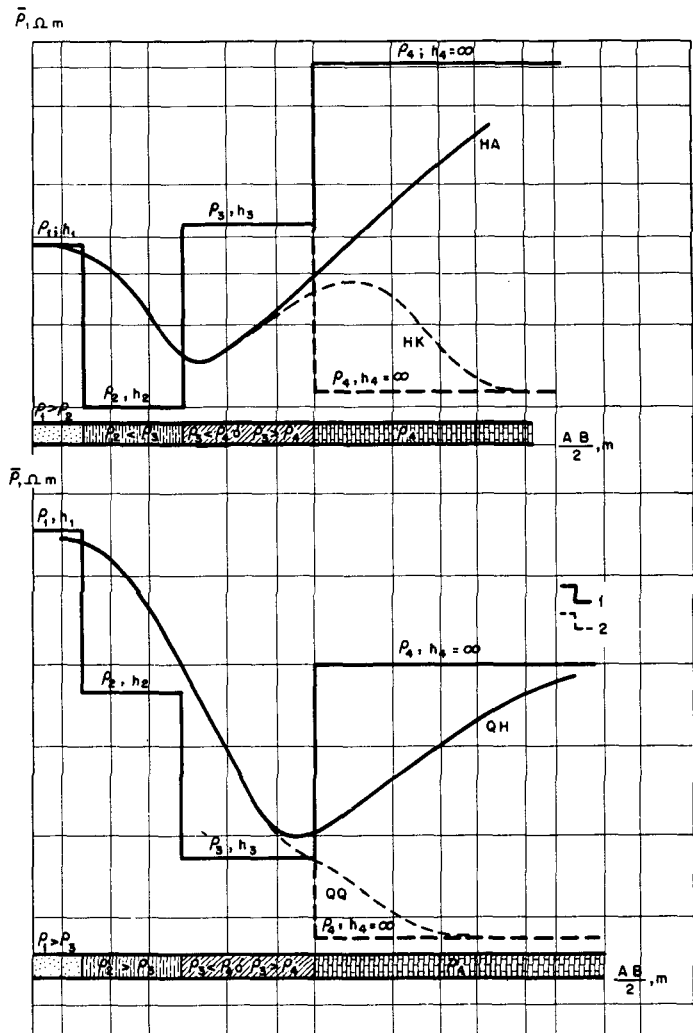


Fig. 13.—Tipos de curvas de SEV de cuatro capas. 1,2—Gráficas de espesores y resistividades verdaderas de las capas.

La interpretación de las curvas de SEV del terreno que exploramos, es necesario llevarla estrechamente vinculada con los resultados de la exploración geológica, estudio de los testigos de sondeos mecánicos y cualquier otro efectuado en el citado terreno. No se puede interpretar una curva de SEV aislada de las restantes, sino que hay que interpretarlas agrupadas según las particularidades geológicas y geofísicas de la región que se explora.

En el presente manual hemos adoptado el criterio de estudiar separadamente los métodos de interpretación de las curvas de SEV de cada tipo, empezando con los más simples de dos capas y terminando con los más complejos de capas múltiples. Con esta forma de exposición se tiende a aclarar los fundamentos de la interpretación. Sin embargo, el interpretador tiene que saber elegir de entre los diversos métodos aquéllos que pueden dar los resultados más reales en función de las condiciones geoelectricas.

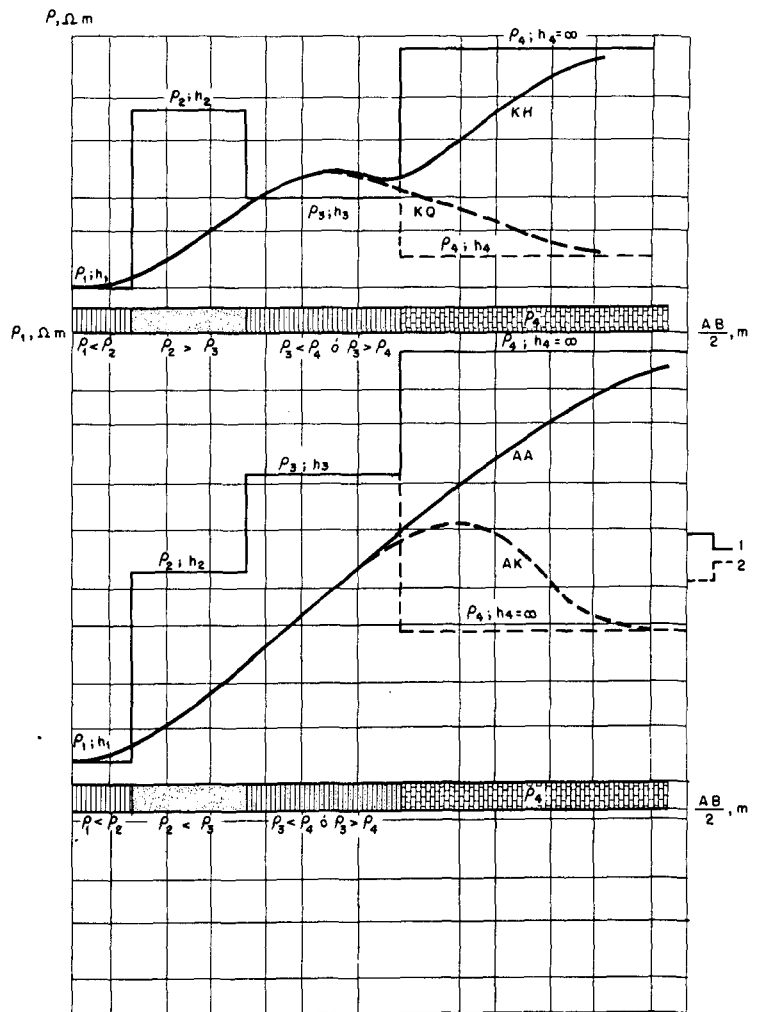


Fig. 14.—Tipos de curvas de SEV de cuatro capas. 1,2—Gráficas de espesores y resistividades verdaderas de las capas.

6. Directrices para la interpretación cualitativa y cuantitativa de las curvas de SEV

La denominación de interpretación de las curvas de SEV abarca un extenso y complejo trabajo. Con este nombre se conoce el proceso de correlación de las capas del corte geoelectrico con la estratificación. El trabajo de interpretación, que se realiza no sólo después de terminada la exploración de campo, sino durante la misma, se puede dividir esquemáticamente en tres etapas: 1.^a) Estudio del corte geoelectrico. 2.^a) Interpretación cualitativa de las curvas de SEV. 3.^a) Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV.

Esta subdivisión se comprende que es condicional. Las citadas etapas se encuentran estrechamente relacionadas entre sí y con frecuencia se solapan y complementan unas con otras, componiendo un eslabón único en el proceso de interpretación geológica.

La interpretación cualitativa es una etapa muy importante en el trabajo y habitualmente precede a la interpretación cuantitativa. En dicha etapa, se estudia cuidadosamente todo el material de la exploración eléctrica, analizando el aspecto de las curvas, sus particularidades y cambios. Se estudian los resultados de los sondeos mecánicos y las diagráfias eléctricas

hechas en ellos; se determinan los horizontes de apoyo; se calculan los parámetros de las capas eléctricas y los cambios de los diversos tipos de curvas de SEV, perfiles y mapas de resistividades aparentes y conductancias, de la variación de la posición de los puntos extremales de las curvas de SEV, y otros perfiles y mapas que nos den una idea general cualitativa de la geología del terreno explorado. Los resultados de este análisis de las curvas de SEV junto con otros datos del terreno nos sirven para llegar, de modo definitivo, a una interpretación cuantitativa. También suelen ayudar en esta interpretación cuantitativa de las curvas de SEV, los planos del relieve de la superficie del horizonte de apoyo geoelectrico y los cortes geoelectricos.

Tal es, en resumen, el contenido general del trabajo de interpretación.

1

CORTE ELECTRICO DE DOS CAPAS

Corte eléctrico de dos capas

7. Forma de la curva de SEV de dos capas y procedimiento para su interpretación en el caso de límite de separación horizontal

El corte eléctrico de dos capas es el caso más sencillo en la investigación por el método de SEV. Como ya hemos indicado, se denomina así al que presenta una primera capa de espesor h_1 y resistividad ρ_1 y una segunda capa de espesor muy grande y resistividad $\rho_2 \neq \rho_1$. También comprende aquellos casos en que debajo de la primera capa se encuentra otra de poco espesor, pero con resistividad infinitamente grande ($\rho_2 = \infty$) o infinitamente pequeña ($\rho_2 = 0$). En estos casos las curvas de SEV obtenidas no se diferencian por su carácter de las de dos capas.

Tanto la primera como la segunda capa pueden ser de constitución litológica heterogénea, es decir, con presencia de más de un tipo de roca. La sola condición para la homogeneidad eléctrica de una determinada capa es que todas sus rocas constituyentes tengan la misma resistividad eléctrica. En otras palabras, el corte geoelectrico de dos capas queda definido solamente por un buen contraste de resistividades.

Anteriormente se indicó que en el corte de dos capas se observan curvas de dos tipos según la relación entre ρ_2 y ρ_1 . Si $\rho_1 < \rho_2$, el gráfico de $\bar{\rho}$ tendrá el aspecto que se indica en la figura 11 a. La rama inicial de la curva, cuando el valor de $AB/2$ es pequeño, se acerca asintóticamente a una recta paralela al eje de abscisas ($\bar{\rho} = \rho_1$); después $\bar{\rho}$ aumenta poco a poco y cuando $AB/2$ es muy grande en comparación con h_1 , la rama final de la derecha de la curva se aproxima asintóticamente a la horizontal y resulta $\bar{\rho} = \rho_2$. Si la resistividad de la capa inferior es grande en comparación con ρ_1 ($\rho_2 = \infty$), entonces la rama final ascendente de la curva de SEV, para $AB/2$ muy grande, se transforma en una recta inclinada un ángulo de 45° con el eje de abscisas (fig. 15). Esta recta queda definida por la ecuación (12),

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = \frac{AB}{2h_1}$$

Es evidente que en este caso, cuando $\bar{\rho} = \rho_1$, es decir, en el punto de intersección de la prolongación de la asíntota de la rama final de la curva de SEV con la asíntota de su rama inicial, se tiene

$$AB/2 = h_1$$

También se comprueba que el segmento cortado por la prolongación de la asíntota de la rama derecha de la curva de SEV para $\rho_2 = \infty$, en el eje de abscisas ($\bar{\rho} = 1$) es igual numéricamente a la conductancia longitudinal de la capa superior.

En la figura 15 se ha dibujado una serie de curvas de SEV calculadas para el corte de dos capas horizontales con una serie de valores de ρ_2/ρ_1 entre 0 e ∞ . Las curvas están reunidas en forma de ábaco tal que sus ejes de coordenadas son las rectas $AB/2h_1=1$ y $\bar{\rho}/\rho_1=1$. Este ábaco lo denominaremos con la sigla GP-2. Se utiliza para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV obtenidas en la exploración de cortes de dos capas. También se utiliza cuando estudiamos curvas más complicadas de SEV. Lo llamaremos ábaco de las curvas de SEV de dos capas o simplemente ábaco de dos capas.

Como no es difícil ver, la prolongación de la asíntota de la rama final de la curva de SEV, para $\rho_2 = \infty$, pasa por el origen de coordenadas de los ábacos, pues la abcisa del punto de intersección de la asíntota con el eje de abcisas es igual a

$$S = h_1/\rho_1 = 1$$

Hay que indicar que en el origen de coordenadas se cruzan las tangentes en el punto de inflexión de las ramas inclinadas

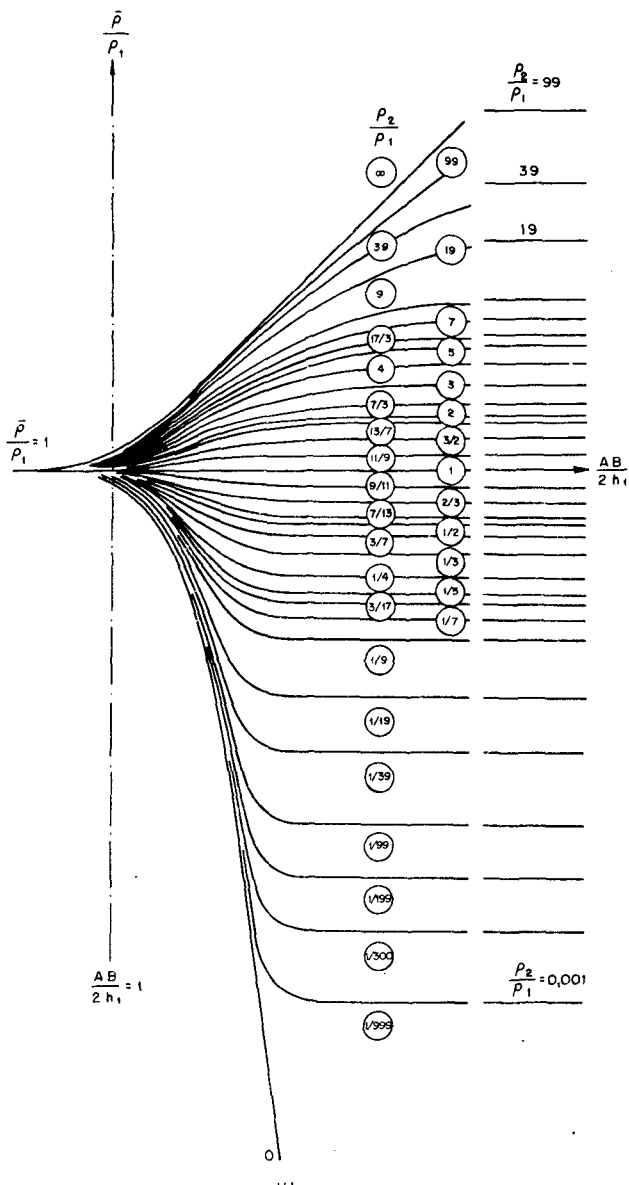


Fig. 15.—Abaco de curvas de SEV de dos capas.

de las curvas de SEV, correspondientes a cualquier valor $\rho_2/\rho_1 > 1$.

Imaginemos un ábaco de las curvas de dos capas de SEV desde otro punto de vista. Tomemos como unidad el valor de ρ_2 , es decir, indicaremos en el eje de ordenadas la relación $\bar{\rho}/\rho_2$ para distintos valores de ρ_1/ρ_2 (fig. 16). Veamos el caso en que la capa superior tiene una resistividad mayor que la capa inferior ($\rho_1 > \rho_2$). Entonces la rama derecha de la curva de SEV alcanza el valor de la asíntota ($\bar{\rho} = \rho_2$) para separaciones $AB/2$ iguales o mayores que $10h_1$. En el caso de que $\rho_1 < \rho_2$ se necesitan separaciones de $AB/2$ mayores que, para el caso de $\rho_1/\rho_2 = 1/4$, serían de $AB/2 = 50h_1$. De lo anterior se deduce que para la exploración eléctrica, desde el punto de vista de extensión del dispositivo es más favorable un terreno de dos capas en el que la capa inferior es poco resistiva.

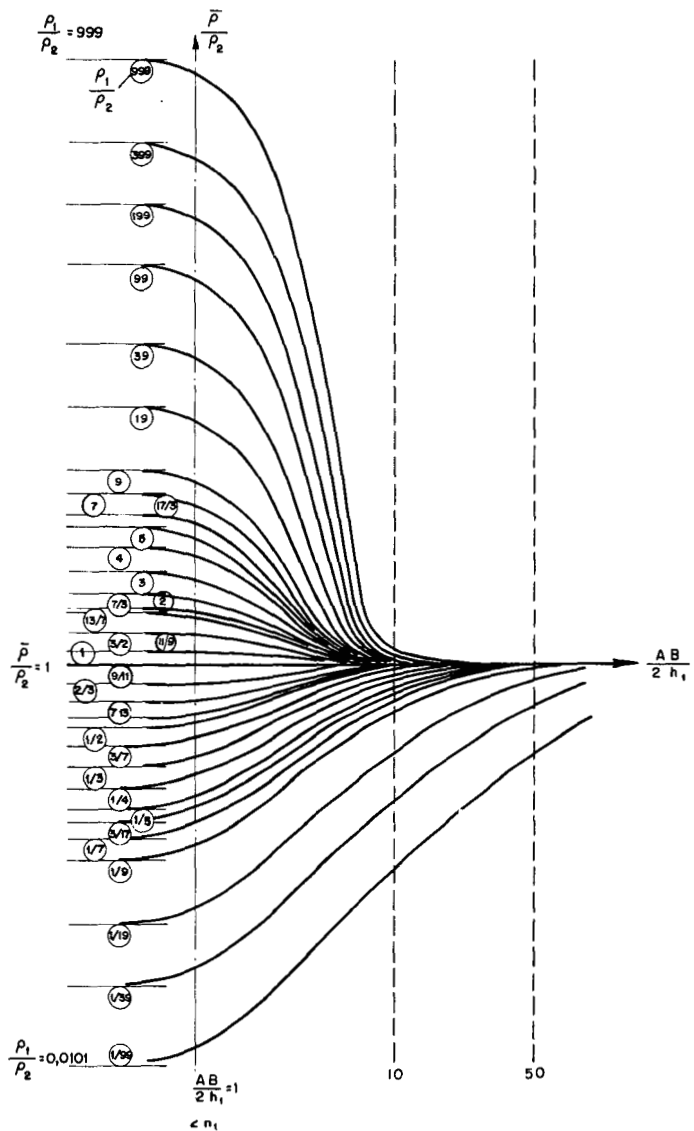


Fig. 16.—Abaco de curvas de SEV de dos capas referidas a ρ_2 .

La interpretación de las curvas de dos capas de SEV con ayuda del ábaco GP-2 es muy sencilla. Haciendo coincidir el eje de abcisas del ábaco ($\bar{\rho}/\rho_1 = 1$) con la asíntota horizontal

($\bar{\rho} = \rho_1$) a la que tiende la rama inicial de la gráfica experimental de SEV se traslada el conjunto hacia la derecha o la izquierda por este eje hasta que se consiga la mejor coincidencia de dicha curva de campo con cualquiera de las curvas teóricas. El eje vertical del ábaco ($h_1 = 1$) corta al eje de abscisas de la gráfica de SEV en un punto cuya abscisa es valor desconocido h_1 , espesor de la primera capa. La posición de la asíntota ($\bar{\rho} = \rho_2$) de la rama derecha del ábaco nos da el valor de ρ_2 . Si la curva de SEV no coincide con ninguna de las curvas del ábaco, es necesario interpolar.

En el caso de $\rho_2 = \infty$, la interpretación se facilita, pues la asíntota de la rama final de la curva de SEV define en el eje $\bar{\rho} = \rho_1$ un segmento que es igual a h_1 .

Tal es el método para la determinación de los parámetros h_1 , ρ_1 y ρ_2 en la interpretación de las curvas de SEV de dos capas.

El valor de estos parámetros se aproxima a los verdaderos si el corte geoelectrónico explorado responde a las condiciones para las que se han calculado las curvas teóricas, es decir, si las capas del corte son isótropas, se extienden lateralmente de modo indefinido y el límite de separación entre ellas es paralelo a la superficie exterior.

Si la capa h_1 posee anisotropía, expresada por un coeficiente λ , entonces el espesor obtenido en el resultado de la interpretación es λ veces mayor que el verdadero. Por consiguiente, para hallar este espesor verdadero h_1 , hay que dividir aquél por λ .

El coeficiente de anisotropía se determina, como ya sabemos, por los resultados obtenidos en la testificación eléctrica de sondeos mecánicos.

Si la capa posee propiedades macroanisótropas, entonces ρ_r , ρ_t y el coeficiente λ pueden determinarse fácilmente mediante los resultados de la testificación. Tales determinaciones, como ya se indicó anteriormente, no se pueden hacer si la capa posee propiedades microanisótropas (se puede determinar tan sólo el valor de ρ_1). En este caso, el valor del coeficiente de anisotropía sólo puede hallarse con ayuda de la interpretación de las curvas de SEV contiguas a sondeos mecánicos. La relación del valor hallado h_1 al espesor verdadero de esta capa, da el valor del coeficiente de anisotropía.

$$\lambda = \frac{h_1 \text{ interp.}}{h_1 \text{ verdad.}}$$

Si la capa posee anisotropía, entonces su resistividad, determinada por la curva de SEV, corresponde a la resistividad media cuadrática de la capa: $\rho_1 = \rho_m = \sqrt{\rho_r \cdot \rho_t}$. Sabiendo que $\lambda = \rho_m / \rho_r$, se tiene $\rho_1 = \lambda \cdot \rho_r$, es decir, el valor de ρ_1 dado por la curva de SEV en el caso de capas anisótropas será igual a λ veces el valor de la resistividad media longitudinal. El valor de esta última en las capas con propiedades macroanisótropas, como ya sabemos, se puede

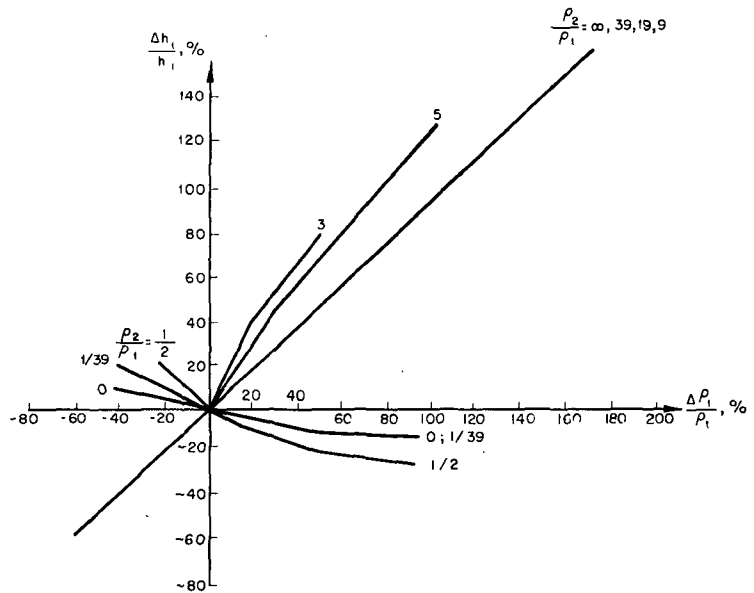
obtener directamente de las diagraffias de los sondeos mecánicos.

Veamos cómo se refleja en los resultados de la determinación del espesor h_1 , un error en la valoración de ρ_1 . Supongamos $\rho_2 > \rho_1$ y en particular $\rho_2 = \infty$. Entonces $h_1 = S \cdot \rho_1$. Es decir, cuando $\rho_2 = \infty$, el error en la determinación de h_1 es directamente proporcional al error de ρ_1 .

Esto vale también para el caso de $\rho_2/\rho_1 \neq \infty$, al menos para los valores de $\rho_2/\rho_1 \geq 9$ (fig. 17). Al disminuir ρ_2/ρ_1 , como nos indica la gráfica, la relación se altera.

En el caso de $\rho_2 < \rho_1$, un error de signo positivo en la determinación de ρ_1 lleva consigo una pequeña disminución del valor de h_1 . El error crece al aumentar ρ_2/ρ_1 . Una disminución del valor de ρ_1 lleva consigo un aumento de h_1 , tanto mayor cuanto más lo sea el valor de ρ_2/ρ_1 (fig. 17).

Fig. 17.—Errores en el cálculo de h_1 , en función del error cometido en la valoración de ρ_1 , en la interpretación de curvas de SEV de dos capas.



8. Caso de confinamiento lateral de las capas

Los ábacos del corte de dos capas están calculados para el caso en que las capas se extiendan lateralmente de modo ilimitado. Si esta condición no se cumple, entonces las curvas de SEV tendrán otra forma. En particular, cuando hacemos el sondeo en un valle estrecho (fig. 18), con flancos y base formados por una roca de resistividad muy alta ($\rho_2 = \infty$) y lecho relleno con sedimentos conductores de resistividad ρ_1 y espesor h_1 de valor numérico aproximado, la semianchura del valle, las curvas de SEV con alineación de electrodos a lo largo del eje del mismo, tienen la rama derecha ascendente con asíntota formando un ángulo con el eje de abscisas mucho mayor de 45° . Los cálculos indican que para $d = h_1$ la rama ascendente final de la curva de SEV forma con el eje de abscisas un ángulo de unos 64° . Al aumentar d , este ángulo disminuye y, aproximadamente, para $d = 20h_1$, la curva adquiere un aspecto análogo al de las curvas normales de dos capas. En tales valles, por consiguiente, y para quedarse del lado de la seguridad, se puede utilizar el ábaco de curvas de

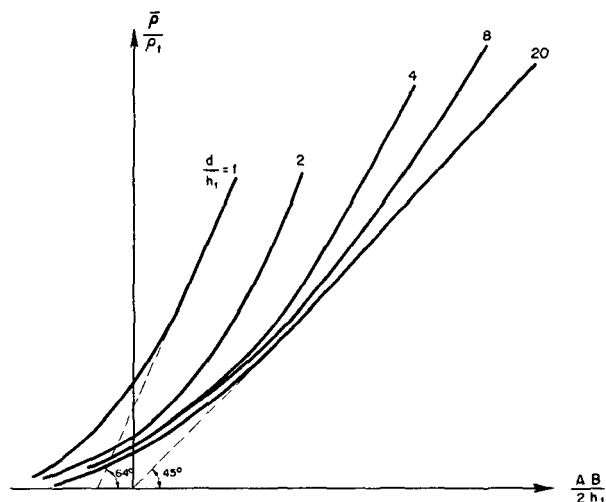
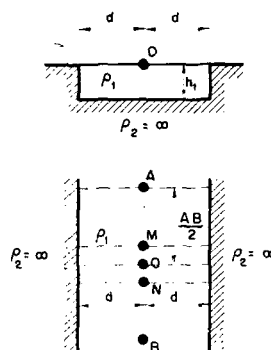


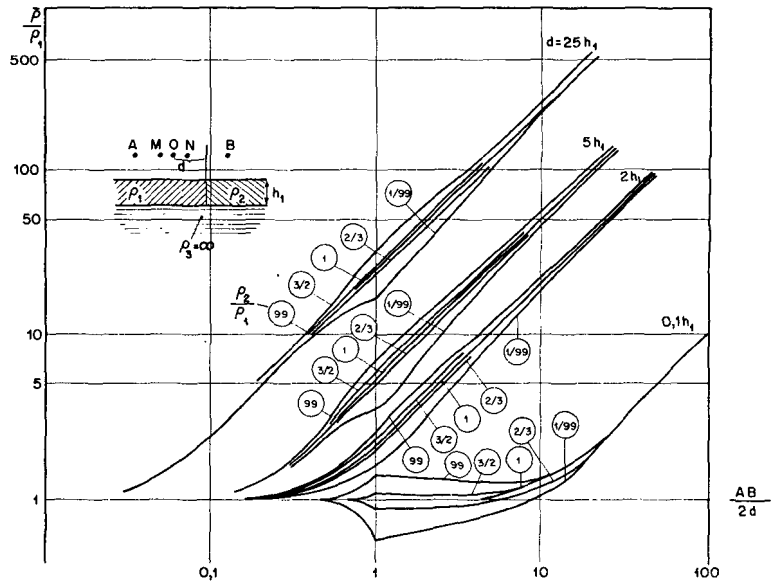
Fig. 18.—Curvas teóricas de SEV de dos capas para el caso de un valle estrecho.



dos capas cuando el ancho del valle sea por lo menos igual a 40 veces el espesor de la capa h_1 .

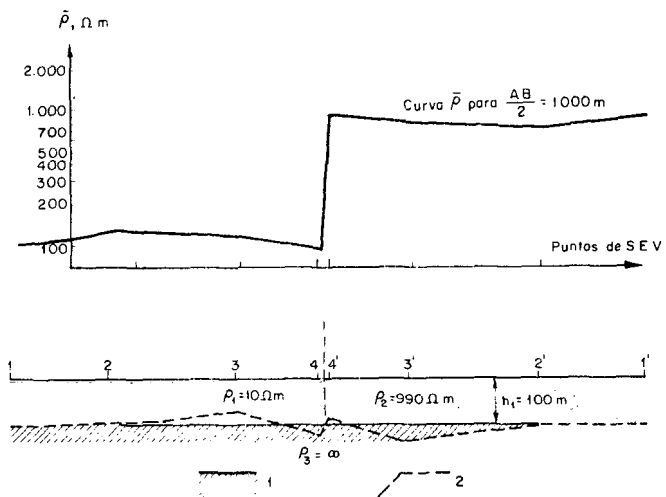
Examinemos otro caso de limitación de la capa superior en el corte eléctrico de dos capas. Supongamos que una capa horizontal de espesor h_1 y resistividad ρ_1 (fig. 19) descansa sobre una capa de resistividad $\rho_3 = \infty$, y tiene un contacto vertical con otra capa de resistividad ρ_2 . Supongamos que el centro O del sondeo está situado a distancia d del plano de separación y supongamos también que los electrodos AB se mueven perpendicularmente al plano de contacto. El cálculo de las curvas de SEV para el caso indicado fue realizado en el Laboratorio de Exploración Eléctrica NIIGR bajo la dirección de M. N. Verdichev (año 1953), con cuatro valores distintos de la relación entre d y h (25; 5; 2; 0,1) y cinco valores de la relación entre ρ_2 y ρ_1 (1/99; 2/3; 1; 3/2; 99). Tomando en el eje de abscisas la relación entre la semiseparación de electrodos $AB/2$ a la distancia d y en el eje de ordenadas, como siempre, $\bar{\rho}/\rho_1$ obtendremos el grupo de curvas indicado en dicha figura 19 (a este conjunto de curvas se le denomina ábaco GVK). Como vemos, las curvas de SEV varían de aspecto en función de la distancia d del punto central del sondeo eléctrico al plano de contacto. La desviación de la curva de SEV respecto de la curva normal de dos capas es mayor cuanto más se diferencie ρ_2/ρ_1 de la unidad, y cuanto menor sea d respecto a h_1 .

Fig. 19.—Ábacos de curvas de SEV para contacto horizontal-vertical de tres medios de distribución AB de electrodos perpendicular a la línea de afloramiento del contacto vertical (Calculados en el Laboratorio de Exploración Eléctrica NIIGR en el año 1953).



Si no se tiene en cuenta la existencia del contacto vertical en el terreno investigado y se interpretan las curvas experimentales de SEV mediante su comparación con los ábacos normales de dos capas, introduciremos errores en la determinación de h_1 , profundidad del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$). Busquemos, utilizando los indicados ábacos GVK, el orden de magnitud de estos errores para los valores extremos de la relación de ρ_2 a ρ_1 (99 y $1/99$). Examinaremos para ello unos ejemplos sencillos. Supongamos que el horizonte de apoyo está a la profundidad $h_1 = 100$ m y además el material que lo cubre se compone de dos capas muy extensas con resistividades 10 y 990 ohm.m y con límite de separación vertical (fig. 20) que aflora en superficie. Supongamos que se realizan SEV, con alineación de electrodos AB perpendicular al plano de contacto, en los puntos 1, 2, 3 y 4, a distancias 2.500, 500, 200 y 10 m a la izquierda de este plano y simétricamente en los puntos 1', 2', 3' y 4' a la derecha de dicho plano. Entonces conforme al ábaco, las curvas de SEV en estos puntos tendrán el aspecto indicado en la fig. 21. Teniendo en cuenta la escala logarítmica y conociendo h_1 y ρ_1 , fácilmente se puede pasar de las curvas del ábaco, que

Fig. 20.—Resultados de la interpretación de las curvas de SEV en el caso de un contacto horizontal-vertical de tres medios. 1—Posición verdadera de la superficie del horizonte de apoyo; 2—Superficie del horizonte de apoyo según los resultados de la interpretación de las curvas de SEV.



vienen en función de $AB/2d$, a las curvas prácticas en su expresión habitual, en función de $AB/2h_1$.

Tomando estas curvas como de SEV de dos capas, y utilizando para su interpretación los ábacos GP-2, obtendremos las profundidades del horizonte de apoyo indicadas en la tabla 4.

Fig. 21.—Curvas de SEV para un contacto horizontal-vertical de tres medios, para diversas distancias del punto de SEV al plano del contacto vertical. Dispositivo AB perpendicular a la traza del plano de contacto con la superficie del terreno.
 1.—SEV en los puntos 1 y 1', $d=25 h_1$;
 2.—SEV en los puntos 2 y 2', $d=5 h_1$; 3.—SEV en los puntos 3 y 3', $d=2 h_1$;
 4.—SEV en los puntos 4 y 4', $d=0,1 h_1$.

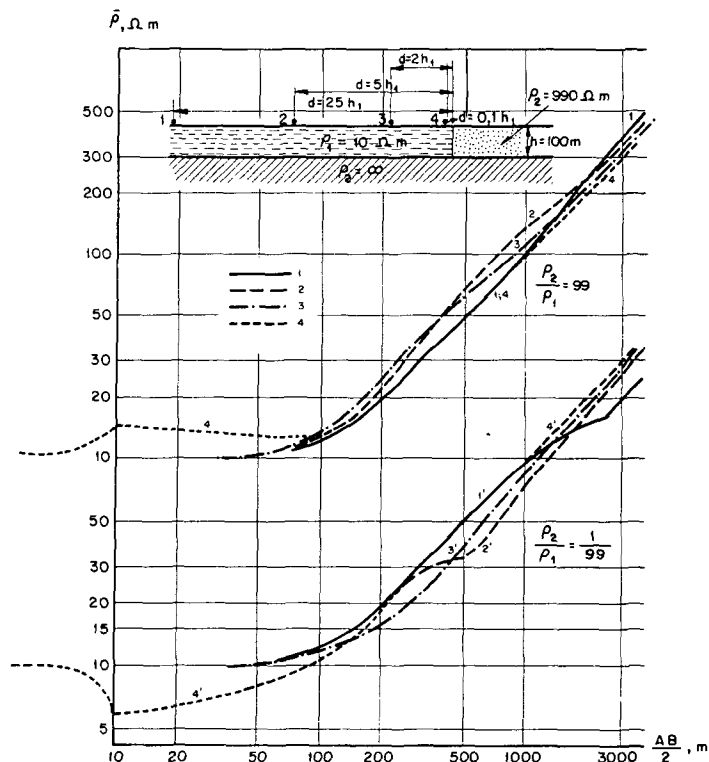


TABLA 4

ERRORES DE INTERPRETACION DE CURVAS DE SEV PROXIMAS A UN CONTACTO VERTICAL

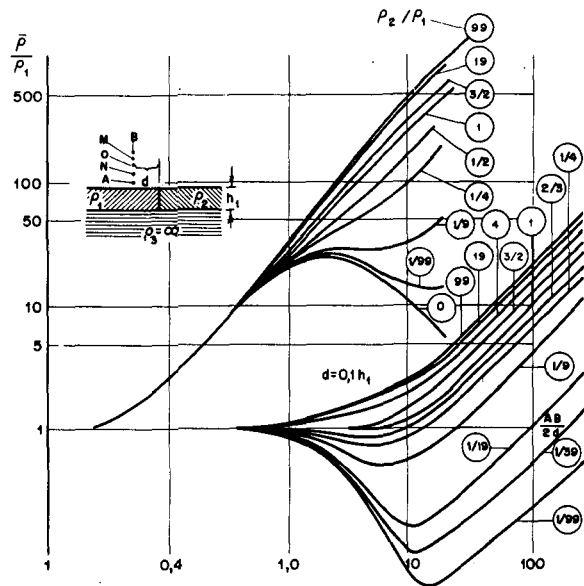
N.º de los puntos de SEV	h_1 (m)	Errores (%)	h_1 (m)	Errores (%)
	para $\rho_2/\rho_1 = 99$		para $\rho_2/\rho_1 = 1/99$	
1 y 1'	105	+ 5	100	0
2 y 2'	100	0	105	+ 5
3 y 3'	85	-15	150	+50
4 y 4'	125	+25	90	-10

La tabla 4 indica que, cuando se aleja el centro del SEV del plano de contacto a distancia $d \geq 5 h_1$, el error de interpretación resulta aceptable (hasta +5%). Pero éste aumenta con rapidez al acercarse el centro del SEV al plano de contacto: hasta ± 15 a $\pm 25\%$ en la zona de valores pequeños de la resistividad ρ_1 , y hasta ± 10 a $\pm 50\%$ en la zona de mayor resistividad. El contacto aparece con valores desiguales en profundidad (fig. 20). De esto se deduce que la existencia de un contacto vertical cerca de los puntos de

SEV, altera los resultados de la interpretación y conduce a una imagen falsa del horizonte de apoyo.

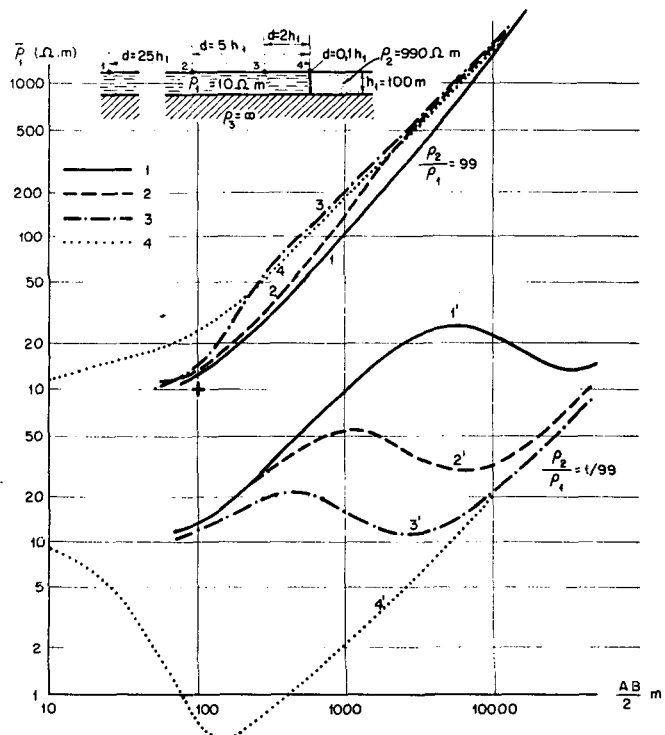
Sobre la existencia de un contacto vertical, pueden ser reveladores las gráficas de resistividades aparentes construidas para separaciones $AB/2$ constantes (fig. 20).

Fig. 22.—Abacos de curvas de SEV calculadas, en caso de contacto horizontal-vertical de tres medios y dispositivo eléctrico AB paralelo a la línea de afloramiento del plano de contacto vertical. (Calculadas en el Laboratorio de Exploración Eléctrica NIIGR, año 1953.)



El aspecto de las curvas de SEV se altera aún más cuando las resistividades de las rocas en contacto vertical son distintas si el SEV se realiza con la línea de electrodos paralela al plano de separación. En este caso según el valor de las relaciones d/h_1 y ρ_2/ρ_1 se pueden obtener curvas de SEV análogas a las de capas múltiples (figs. 22 y 23), y la interpretación de ellas puede llevar el estudio del corte geológico a una conclusión totalmente errónea. Por esto es conveniente evitar la realización de sondeos con los electrodos dispuestos paralelamente a la línea de contacto y, sobre todo, cerca de ella.

Fig. 23.—Curvas de SEV en caso de contacto horizontal-vertical de tres medios, para diversas distancias del punto de SEV al plano de contacto vertical. Dispositivo AB paralelo a la traza del plano de contacto con la superficie del terreno. Los puntos de SEV 1', 2', 3', 4' están a la derecha de la traza, simétricos de los puntos de SEV 1, 2, 3, 4. 1.—SEV en los puntos 1 y 1', $d=25h_1$; 2.—SEV en los puntos 2 y 2', $d=5h_1$; 3.—SEV en los puntos 3 y 3', $d=2h_1$; 4.—SEV en los puntos 4 y 4', $d=0,1h_1$.



9. Curvas de SEV e interpretación de las mismas para el caso de límite de separación de los medios inclinado

En el ábaco GP-2 se tienen las curvas de SEV de dos capas para el caso en que la superficie de separación entre ellas es paralela a la superficie exterior. En la práctica esta situación se encuentra muy raramente. Habitualmente, los sondeos eléctricos verticales se realizan sobre medios que poseen el límite de separación inclinado. Tan sólo para facilitar la interpretación se supone que estos límites son horizontales en cada punto de SEV.

Por ello es de interés práctico el estudio de las variaciones de la resistividad aparente en un sondeo eléctrico de dos capas con límite de separación inclinado. La solución teórica de este caso ha sido dada por L. M. Al'pin y A. N. Tijonov. Las curvas calculadas por las fórmulas de Al'pin están recogidas en una colección de ábacos de tres capas editada por un grupo de geofísicos estatales (GSGT) en el año 1941 y en el libro de V. N. Dajnov.

Estas curvas han sido calculadas para el caso en que el medio esté dividido en dos zonas de resistividad distinta ρ_1 y $\rho_2 > \rho_1$ (ρ_2/ρ_1 desde 4 hasta ∞), estando comprendido el ángulo α , del plano de separación de los dos medios con la horizontal, entre $22^\circ 30'$ y 90° . Se supone que los sondeos se realizan a una distancia R_0 de la línea L de intersección con el terreno del plano de separación, y con la alineación de electrodos paralela a L. El conjunto de estas curvas se ha denominado ábaco NZL. L. M. Al'pin ha calculado 16 ábacos distribuidos en tres series: NZL-11, NZL-14 (4 ábacos); NZL¹-1, NZL¹-6 y NZL⁰-1, NZL⁰-6 (con 6 ábacos cada uno).

En los ábacos NZL se representan curvas que dependen de $\bar{\rho}/\rho_1$ y de la relación de la semiseparación de electrodos AB/2 a la profundidad h al plano de separación desde el punto de sondeo. Cada uno de estos ábacos está formado por un grupo de curvas para un ángulo α constante y relación ρ_2/ρ_1 variable. En la figura 24, a modo de ejemplo, se representa el ábaco NZL-11 para $\alpha = 22^\circ 30'$. Hay calculados ábacos análogos para $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ y 60° .

En los ábacos NZL¹, las curvas dependen de $\bar{\rho}/\rho_1$ y de la relación de AB/2 a h' , siendo h' la distancia desde el punto de sondeo al plano de separación, medida perpendicularmente a dicho plano. Cada uno de los ábacos NZL¹ corresponde a una curva en que la relación ρ_2/ρ_1 es constante y los valores de α variables. En la figura 25 se representa el ábaco NZL¹-6 para $\rho_2/\rho_1 = \infty$. Análogos a este ábaco existen otros para $\rho_2/\rho_1 = 99, 19, 9$ y 4 .

En los ábacos de la serie NZL⁰ se incluyen curvas que dependen de $\bar{\rho}/\rho_1$ y de la relación de AB/2 a R_0 , siendo R_0 la distancia mínima del punto del SEV a la recta L. En los ábacos NZL⁰ se agrupan curvas con valores constantes de ρ_2/ρ_1 y variable de α . En la figura 26 se reproduce uno de los ábacos de la serie. Es el calculado para $\rho_2/\rho_1 = \infty$. Existen ábacos de este tipo para valores ρ_2/ρ_1 igual a 99, 39, 19, 9 y 4.

A igualdad de la relación ρ_2/ρ_1 , y para las mismas profundidades del horizonte de apoyo, las curvas, para el caso

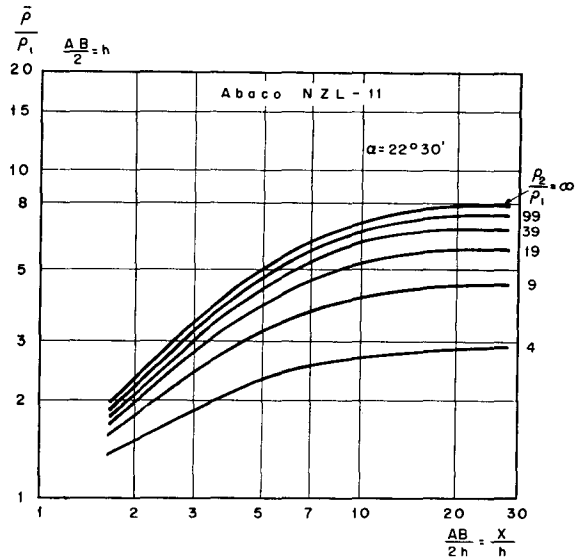
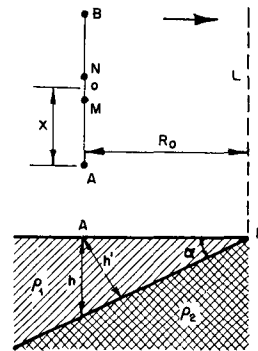


Fig. 24.—Abacos NZL—11.



de límite de separación inclinado dan en la rama derecha valores más bajos de \bar{p} que las gráficas de SEV para el caso de plano de separación horizontal. En particular, la rama derecha de las curvas, para $\rho_2 = \infty$ no tiene la asíntota formando ángulo de 45° con el eje de abscisas, sino que tiende a un determinado valor que será tanto menor cuanto mayor sea el ángulo α (fig. 25).

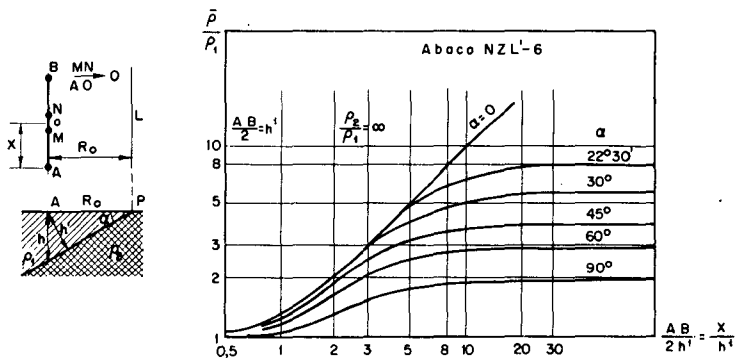
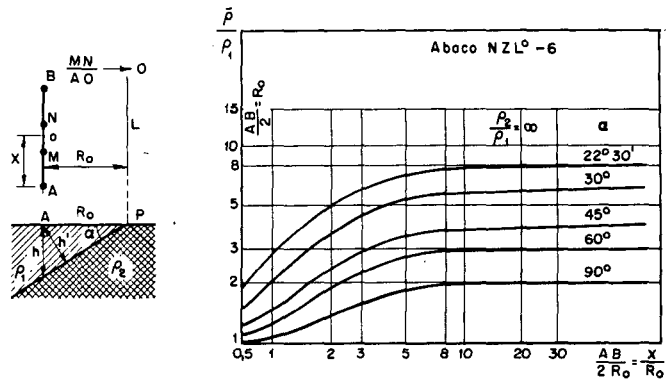


Fig. 25.—Abaco NZL'—6.

Veamos cómo varía la curva de sondeo para $\rho_2 = \infty$, en caso de valor fijo de ρ_1 e igual profundidad del horizonte de apoyo en el punto de sondeo, pero con diversos ángulos del plano de separación (0° , $22^{\circ} 30'$, 30° , 45° y 60° , fig. 27). La curva de SEV correspondiente al caso $\alpha = 0$, la transportamos al impreso logarítmico del ábaco normal de curvas de dos capas

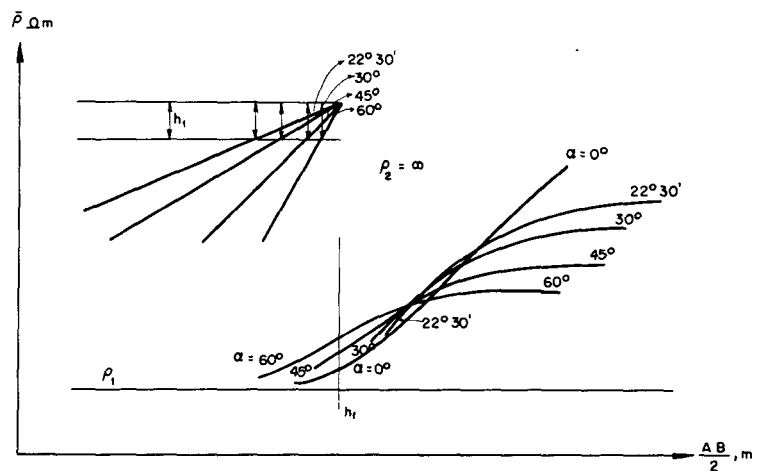
y las curvas para otros ángulos de inclinación de los ábacos NZL-11 y NZL-14. Su comparación hace ver que se diferencian bastante entre sí, tanto a la derecha como a la izquierda. Además, vemos que con el aumento del ángulo de inclinación la resistividad aparente señalada por la parte inicial de la curva crece, pero la señalada por la parte final decrece.

Fig. 26.—Abaco NZL° — 6.



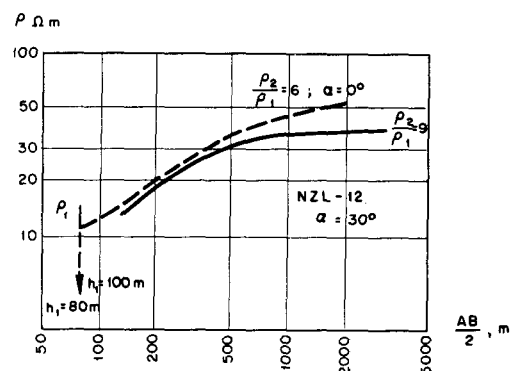
Si las curvas del sondeo eléctrico realizado sobre un corte de dos capas con límite de separación inclinado se interpretan como curvas de SEV con límite de separación horizontal, los errores serán mayores cuanto mayor sea el ángulo de inclinación del plano de separación. Sea, por ejemplo, este

Fig. 27.— Comparación entre las curvas de SEV de dos capas para diversos ángulos de inclinación del plano de separación de los dos medios. Alineación AB paralela a la línea de intersección con el terreno del plano de separación.



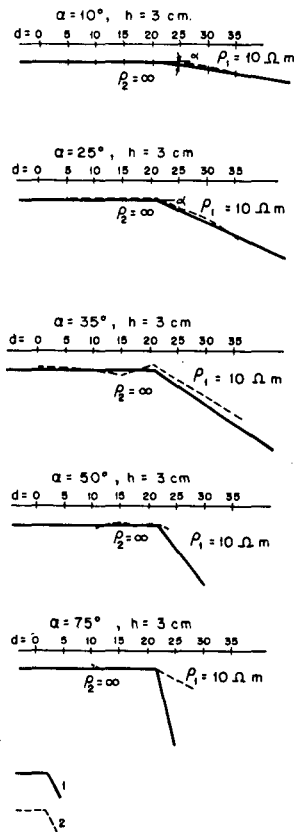
ángulo igual a 30° y la profundidad del medio infrayacente para $\rho_1 = 10$ ohm.m, $\rho_2/\rho_1 = 9$, de cien metros en el punto de investigación. La curva de sondeo tendrá la forma indicada de trazo continuo en la figura 28. Suponiendo el límite de

Fig. 28.—Error en la interpretación de la curva de SEV en caso de plano de separación inclinado $\alpha = 30^\circ$, suponiendo que el mismo es igual a cero.



separación horizontal y comparando la curva obtenida con las del ábaco normal de dos capas no encontraremos una gráfica que coincida exactamente con ella, pero la rama inicial coincide sensiblemente con la de la curva correspondiente a $\rho_2/\rho_1 = 6$, $h_1 = 80$ m. Es decir, que suponiendo el plano de separación horizontal cometemos un error en la determinación de la profundidad de la segunda capa de casi -20% y en el valor de la resistividad ρ_2 un error de aproximadamente -35% . En estas mismas condiciones y con un ángulo de inclinación del plano de separación de 60° , se produce una disminución de aproximadamente 55% en la profundidad ($h_1 = 45$ m) y de casi 70% en la resistividad ($\rho_2/\rho_1 = 3$). De la observación de las gráficas en otros ábacos NZL se comprueba que, cuando en la interpretación se toman las curvas para dos capas con límite de separación horizontal en lugar del límite inclinado, se cometen errores que crecen con el incremento del ángulo de inclinación y de la relación ρ_2/ρ_1 .

Fig. 29.—
Resultados de interpretación de curvas de SEV en caso de límite de separación de dos medios inclinado, según ensayos de laboratorio (por S. M. Sheiman, L. P. Dolin y otros).
1—Situación del límite de separación verdadero;
2—Situación del límite de separación obtenido por los resultados de la interpretación de los SEV.

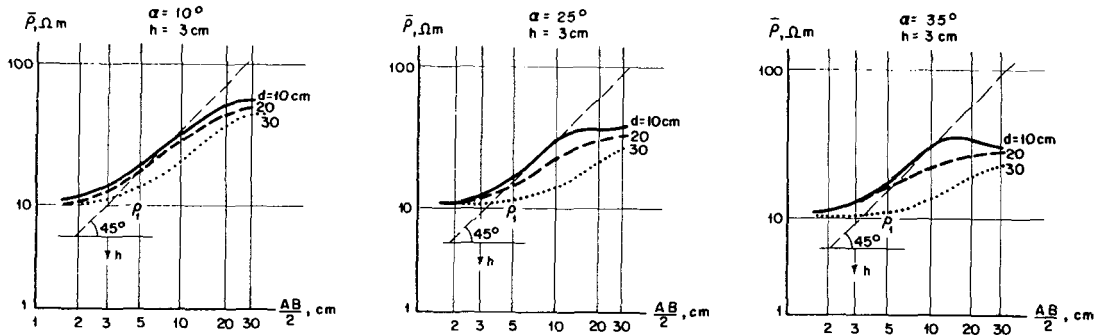


Citaremos unos cuantos resultados de las investigaciones de laboratorio efectuadas, para el caso de límite de separación inclinado. Fueron realizadas en los años 1935 y 1936 por S. M. Sheiman, L. P. Dolin y otros, antes de la publicación de los ábacos NZL. Las experiencias se realizaron sobre modelo de parafina ($\rho_2 = \infty$) en forma acuñada. El modelo se sumergía dentro de un depósito lleno de agua salada ($\rho_1 = 10$ ohm.m); a una de las caras angulares de la cuña se le daba una posición horizontal y la otra formaba con ella el ángulo α , que tomaba los valores $10^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 50^\circ$ y 75° . La profundidad sumergida de la parte horizontal del modelo variaba de 1 a 3 cm. Los electrodos de corriente (AB, hasta

50 y 80 cm.) estaban alineados paralelamente a las aristas de las dos caras.

De las condiciones de cálculo de los ábacos NZL ($\rho_2 = \infty$) a las condiciones de estas experiencias existe la diferencia de que en estas últimas la línea de contacto no aflora en superficie. A modo de ejemplo, en la figura 30 se han representado diversas gráficas de

Fig. 30.—Curvas de SEV con límite de separación inclinado, obtenidas en laboratorio.



sondeos obtenidas en los modelos de la figura 29 con ángulos α de 10° , 25° y 35° y también en la figura 29 los resultados de la interpretación de estas gráficas con ayuda del ábaco GP-2. Las gráficas de SEV que pertenecen a puntos situados sobre la parte horizontal del modelo, tienen un aspecto muy parecido al normal en las curvas de dos capas, sobre todo para el caso en que la capa inferior tiene resistividad infinita. Cuando el punto de SEV se aproxima al borde del modelo o queda sobre la superficie inclinada de separación, entonces la curva adquiere una forma propia de las curvas teóricas en las que el valor ρ_2/ρ_1 es finito. Cuanto mayor sea el ángulo de inclinación del plano de separación, mayores son las diferencias. Como vemos (fig. 29) para $\alpha = 10^\circ$ los resultados de la interpretación de las curvas de SEV casi coinciden con la profundidad real de la superficie investigada. Para $\alpha = 25^\circ$ ya se presenta algún error en la determinación de la profundidad del plano inclinado y para $\alpha = 35^\circ$ los errores, en sentido de disminuir respecto a su valor real, exceden ya del 25%. Con valores de α aún mayores (50° a 75°) se ve que los resultados de la interpretación de las curvas de SEV con ayuda del ábaco GP-2 son tanto más erróneos (en sentido de la disminución de la profundidad real) cuanto mayor sea α . Las experiencias realizadas han puesto de manifiesto que la profundidad de la superficie de separación, para un mismo valor del ángulo α , no influye de modo esencial en la magnitud del error.

De acuerdo con estos ensayos de tipo experimental, para límite de separación inclinado y $\rho_2 = \infty$, se ve que pueden utilizarse en la interpretación las gráficas normales de curvas de dos capas para ángulos de hasta $\alpha = 25^\circ$, ya que el error sería del 10 al 15%. Pero incluso hasta con ángulos de $\alpha = 35^\circ$ se aprecia con suficiente precisión el buzamiento del horizonte de apoyo, aunque los resultados de la interpretación de las curvas de SEV llevan en sí errores de consideración.

Supongamos que la superficie de separación entre dos capas de resistividades $\rho_1 = 10$ ohm.m, $\rho_2 = \infty$, tiene un ángulo de

buzamiento de $22^{\circ} 30'$ (valor mínimo del ángulo para el que están calculados los ábacos NZL). Utilizando el ábaco NZL-11, es fácil interpretar las curvas de sondeo para una serie de puntos del terreno. Haciéndolo con ayuda de los ábacos normales de dos capas, es decir, suponiendo que en cada punto sondeado del terreno el plano de separación es horizontal, obtendremos profundidades que se diferencian, por término medio, en un -25% de las verdaderas profundidades del plano inclinado de separación en cada uno de los puntos de SEV. Por consiguiente, las curvas NZL indican que, en caso de $\rho_2 = \infty$, y para salida del plano inclinado a la superficie del terreno, ya para ángulo $\alpha = 22^{\circ} 30'$, la utilización del ábaco normal de dos capas para la interpretación, origina un error de consideración en el valor de la profundidad a que yace este plano. En la práctica, el ángulo α de inclinación con el que todavía se puede utilizar el ábaco normal de dos capas en la interpretación de las curvas de SEV con límite de separación inclinado, para el caso de $\rho_2 = \infty$, no debe ser mayor de 15° . Al reducirse la resistividad de la capa inferior, este ángulo límite puede aumentarse. Supongamos, por ejemplo, que la segunda capa posee resistividad ρ_2 tan sólo cuatro veces superior a ρ_1 , y el ángulo de buzamiento del plano de separación se conserva igual que en el caso anterior, es decir, $\alpha = 22^{\circ} 30'$. La interpretación de las curvas en este caso, al utilizar el ábaco normal de dos capas, origina un error en el valor de la profundidad del 10% . Por consiguiente, en este caso puede admitirse un ángulo límite del orden de 25° .

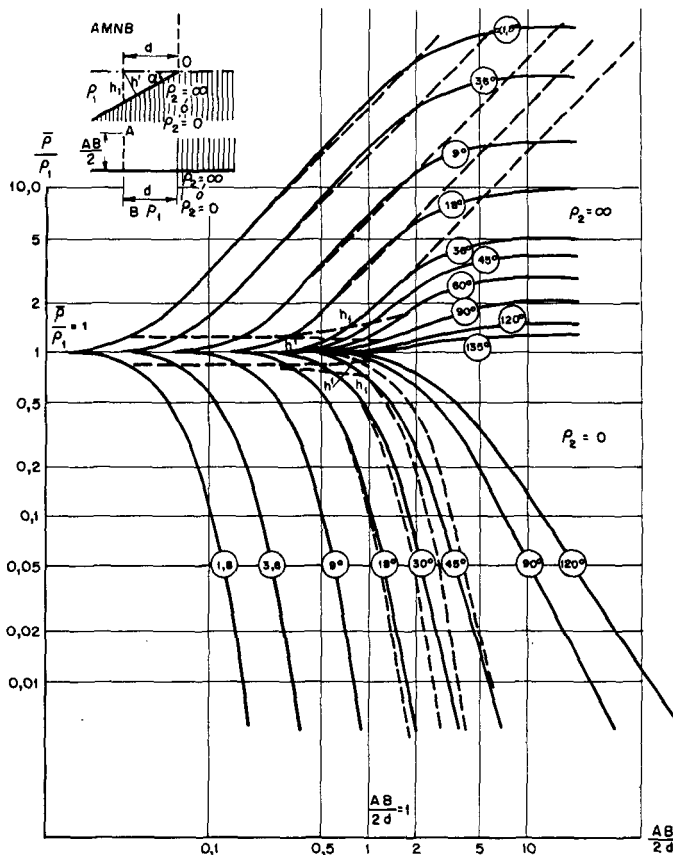
En la práctica de la exploración eléctrica suele presentarse principalmente el caso de plano de separación enterrado. Basándose en las investigaciones de laboratorio y en las curvas teóricas NZL se puede estimar que el ángulo límite de inclinación para $\rho_2 = \infty$, con que aún es posible, sin grandes errores, la interpretación de los sondeos con ayuda del ábaco normal de dos capas, es de casi 20° ; dicho ángulo aumenta al disminuir el valor de la relación ρ_2/ρ_1 .

A la colección de ábacos GSGT hay que añadir también los designados con los símbolos Ci-1S y Ci-2S, representados en la figura 31.

Estos ábacos, calculados en su día por investigadores franceses, pueden reunirse también con los de la serie NZL. En ellos están agrupadas las curvas teóricas de SEV con alineación AB paralela a la línea de afloramiento del contacto inclinado en el caso de $\rho_2 = \infty$ y $\rho_2 = 0$; los ángulos α del plano inclinado van de $1^{\circ} 8'$ a 135° . El ábaco Ci-1S se diferencia del ábaco NZL-6 (ver fig. 26) tan sólo en que contiene una serie de curvas calculadas para ángulos de pequeña inclinación y mayores de 90° . Es interesante indicar que, para $\rho_2 = \infty$ y ángulos de inclinación relativamente pequeños (2° a 18°), la rama ascendente de las curvas de sondeo forman un ángulo con el eje de abscisas ligeramente superior a 45° .

En el NIIGR se han calculado unos ábacos de curvas de SEV de dos capas con plano de separación inclinado ($\rho_2/\rho_1 = \infty$, $\rho_2/\rho_1 = 0$) para buzamiento α entre 1° y 90° , y con línea de

Fig. 31.—Ábaco de curvas de SEV con distribución AB paralela a la línea de afloramiento del contacto inclinado, para diversos ángulos de buzamiento del plano de contacto (ábaco Ci—1S y Ci—2S). Están señaladas de puntos algunas curvas del ábaco de dos capas con su origen de coordenadas en el punto $\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = 1$ y $\frac{AB}{2d} = 1$.



electrodos perpendicular a la de afloramiento del plano de separación (fig. 32). El valor de $\bar{\rho}/\rho_1$ está en función de la relación entre $AB/2$ y la distancia d del punto de SEV a la línea de contacto. Este ábaco se ha denominado NK. Las curvas del mismo, en su parte izquierda, se diferencian poco de las correspondientes con alineación paralela a la línea de afloramiento del plano de separación. Sin embargo, para $\rho_2/\rho_1 = \infty$, las primeras suben más bruscamente (con ángulo bastante superior a 45°) y, a partir de $\alpha = 10^\circ$, varían en su parte izquierda respecto a las segundas (fig. 33).

En el caso de $\rho_2/\rho_1 = 0$ y para $\alpha < 18^\circ$, las curvas de SEV con alineación AB perpendicular a la línea de afloramiento se desplazan a la derecha respecto a las curvas de SEV con alineación paralela a la línea de afloramiento. Con ángulo $\alpha > 18^\circ$ la desviación es a la izquierda.

No deben dejarse de mencionar, para el caso de límite de separación inclinado, los interesantes ábacos de curvas de SEV obtenidas para dispositivo tripolar AMN (B en el infinito), en el caso de $\rho_2/\rho_1 = \infty$ y $\rho_2/\rho_1 = 0$. Estas curvas se diferencian mucho entre sí, sobre todo para $\rho_2 = \infty$, según se aleje el electrodo A del centro del sondeo en la dirección de subida y bajada del plano de separación. En la fig. 34 se representan y comparan las curvas de SEV para ambas direcciones con $\alpha = 1^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ y 30° . Como se ve, hasta con ángulos de buzamiento pequeño, las curvas de SEV se diferencian bastante entre sí. Esto permite, utilizando este dispositivo tripolar, resolver el problema de la dirección en la que buza el plano de separación de las capas y el orden de magnitud de los valores de este ángulo de buzamiento.

Fig. 32.—Abaco de curvas de SEV para el caso de plano de separación de los dos medios inclinado. Alineación AB perpendicular a la línea de intersección con el terreno del plano de separación (calculado en el Laboratorio de Exploración Eléctrica NIIGR en el año 1953).

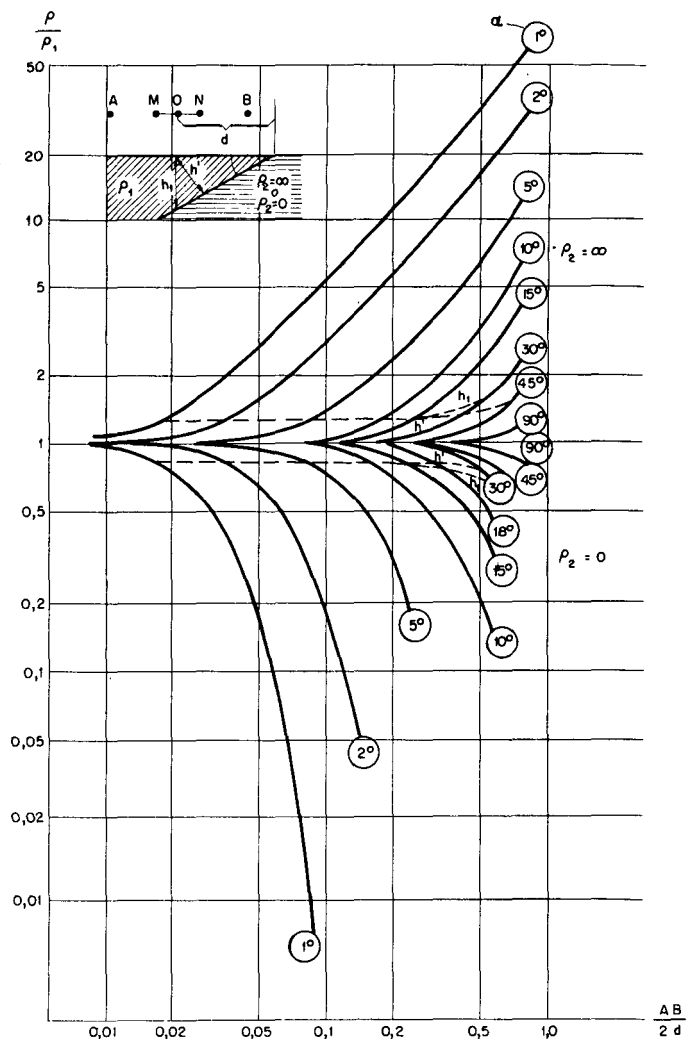


Fig. 33.—Comparación de las curvas de SEV para el caso de separación de los dos medios inclinado, con alineación AB perpendicular y paralela a la línea de afloramiento. 1.—Curvas de SEV con alineación AB perpendicular a la línea de afloramiento. 2.—Curvas de SEV con alineación AB paralela a la línea de afloramiento.

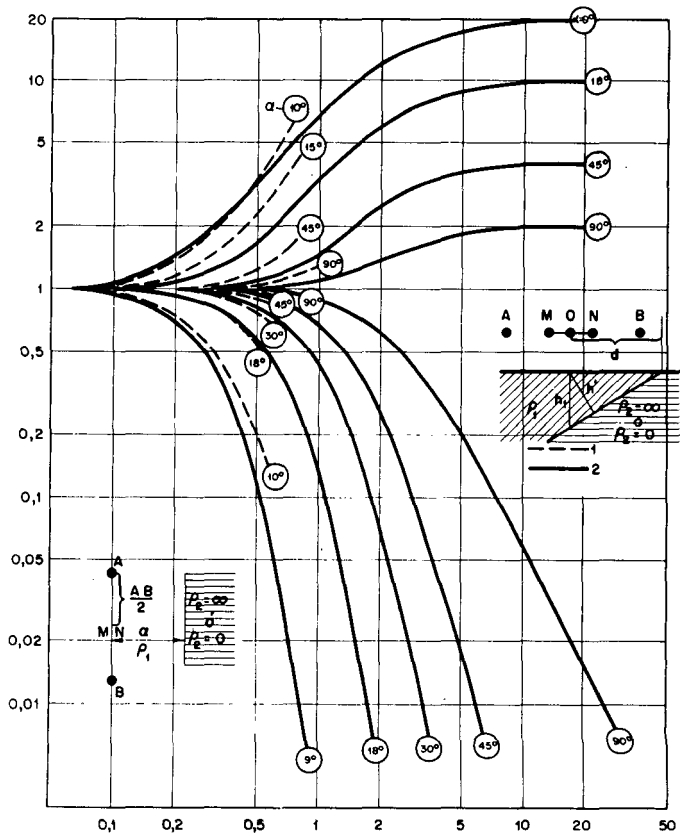
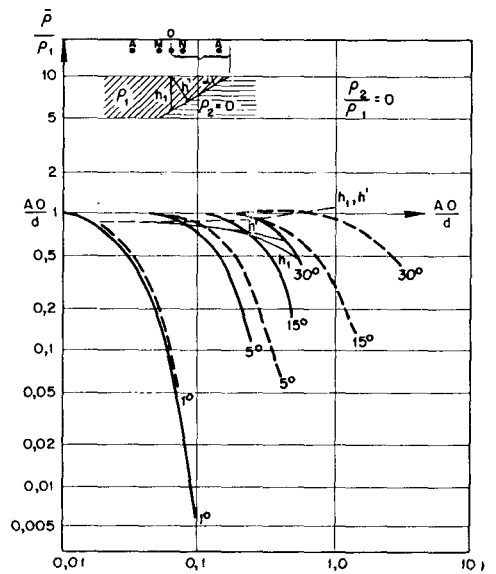
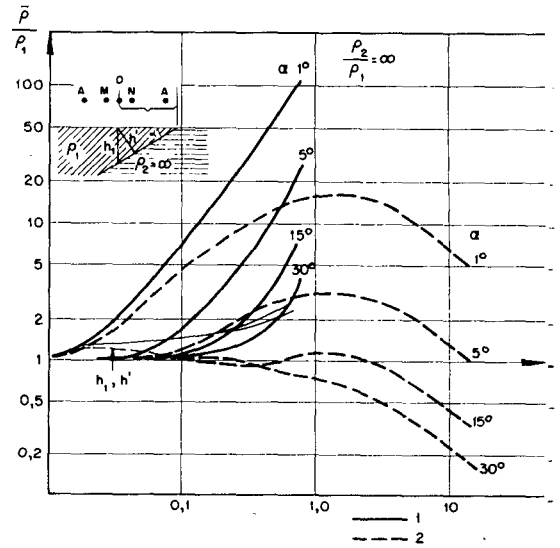


Fig. 34.—
 Comparación
 de ábacos de
 curvas de SEV
 obtenidos con
 dispositivo AMN
 ($B \rightarrow \infty$) de tres
 electrodos sobre
 plano de
 separación
 inclinado, al
 separarse el
 electrodo A en
 dirección del
 levantamiento
 y del hundimiento
 del plano de
 separación.
 (Abacos
 calculados en el
 Laboratorio de
 Exploración
 Eléctrica NIIGR
 en el año 1953.)
 1.—El electrodo A
 se aproxima a la
 línea de
 afloramiento.
 2.—El electrodo A
 se aleja de la línea
 de afloramiento.



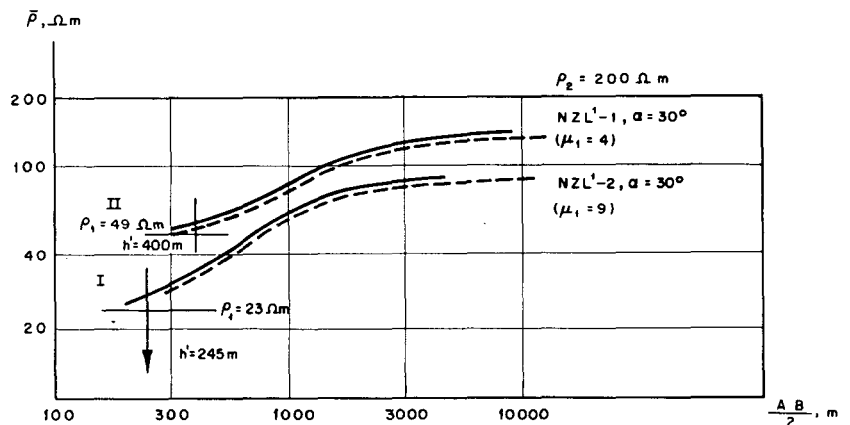
La utilización en la práctica de los ábacos de curvas con límite de separación inclinado no presenta dificultad. Al iniciar la interpretación de las curvas de campo de SEV para el corte eléctrico de dos capas en el que el plano de separación presenta un determinado ángulo, es necesario determinar con la mayor exactitud posible el valor de este ángulo basándonos en el estudio geológico general de la región y fijar, como es habitual, mediante el análisis de todo el material geológico y eléctrico, el valor más probable de la resistividad de la segunda capa. La utilización de los ábacos correspondientes a los parámetros aceptados α y ρ_2 no dará por el resultado de la interpretación, los valores de h y h' . En ellos hay que introducir una corrección debido a la anisotropía de la roca, si es que se logra determinar el coeficiente de anisotropía.

En la práctica, para la interpretación de las curvas de dos capas, en el caso de límite de separación inclinado, basta con conocer tan sólo uno de los parámetros α o ρ_2 . Disponiendo de cualquiera de estos valores y mediante los ábacos se puede determinar el otro, así como h , h' o R . Para ello, el interpretador deberá, de los ábacos NZL, formar otros en los

que se reúnan curvas para ρ_2/ρ_1 constante y α variable, y de los NZL¹ y NZL⁰, otros que tengan α constante y ρ_2/ρ_1 variable.

A modo de ejemplo, sea un corte eléctrico de dos capas, en el que el límite de separación es inclinado y la resistividad de la segunda capa de 200 ohm.m. Supongamos que se quieren interpretar las dos curvas de sondeo representadas en la figura 35. Con ayuda del ábaco normal de dos capas, encontramos para la primera curva $\rho_1 = 23$ ohm.m y por consiguiente $\rho_2/\rho_1 = 9$; para la segunda, $\rho_1 = 49$ ohm.m y $\rho_2/\rho_1 = 4$. Utilizando los ábacos NZL¹-2 ($\mu_1 = 9$) y NZL¹-1 ($\mu_1 = 4$), obtenemos en los dos casos un valor $\alpha = 30^\circ$. Por los resultados de la interpretación tenemos la primera curva $h' = 245$ m y para la segunda $h' = 400$ m. Mediante las construcciones correspondientes encontramos la profundidad de la superficie de la segunda capa, 280 y 460 m. Utilizando para la interpretación de las curvas el ábaco NZL-12, calculado para $\alpha = 30^\circ$, obtendremos aproximadamente los mismos valores. Si supiéramos de antemano que $\alpha = 30^\circ$, se podría haber utilizado directamente este último, sin emplear el primero NZL, y determinar la profundidad incógnita sin la construcción suplementaria.

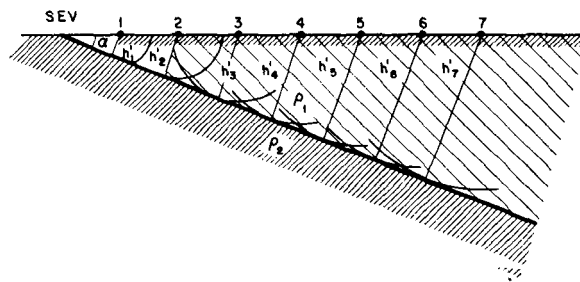
Fig. 35.— Interpretación de las curvas de SEV de dos capas con límite de separación inclinado, mediante el ábaco NZL¹.



Si para la interpretación de las gráficas indicadas de SEV hubiéramos supuesto que el límite de separación era horizontal en cada punto de sondeo, y para la determinación de h hubiéramos utilizado el ábaco normal de curvas de dos capas, habríamos obtenido los valores de 230 y 360 m (con ello ρ_2 sería igual a 90 y 145 ohm.m). Este resultado, como vemos, hace variar notablemente la situación real del horizonte de apoyo, pero, sin embargo, el descenso de la roca desde el punto I hasta el II, quedaría establecido con ayuda de las SEV.

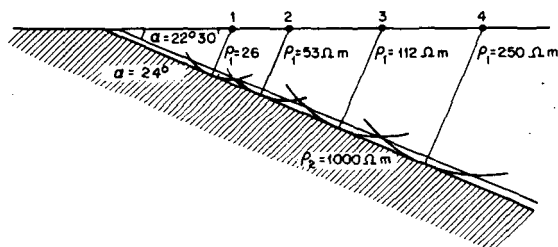
Los ábacos para las distintas inclinaciones del plano de separación nos dan la posibilidad de resolver fácilmente el problema, conociendo tan sólo uno de los parámetros del corte, sea α o ρ_2 . ¿Pero cómo vamos a hacerlo si durante la obtención no conocemos con seguridad ni uno ni otro? En este caso los resultados de la interpretación llevarán en sí los errores inevitables inherentes a la inexactitud de cálculo de los parámetros del corte.

Fig. 36.—
Construcción
del corte eléctrico
con los datos
de la
interpretación de
las curvas de SEV
mediante el
ábaco NZL¹.



Si no conocemos exactamente ninguno de los parámetros, se puede considerar el valor más apropiado, de acuerdo con la investigación geológica general, del ángulo de buzamiento α , y hacer la interpretación de las curvas de SEV, en los diversos puntos de los perfiles con ayuda de los ábacos NZL¹ o NZL, a partir de este valor supuesto de α . Los puntos de SEV de los perfiles se trasladan al plano, conservando a escala la distancia entre ellos. Utilizando, por ejemplo, el ábaco NZL¹ obtendremos el valor de h' , distancia en la perpendicular a la superficie de separación inclinada. Al mismo tiempo que determinamos esta distancia se construye el corte. Para facilitar esta construcción se puede utilizar el procedimiento propuesto por V. N. Dajnov. Con ayuda del compás se trazan arcos de circunferencia de radio h' y centro los puntos de sondeo (fig. 36); la superficie de separación debe ser tangente a estos arcos. Trazada esta tangente, con ayuda del transportador, se determina el ángulo α de inclinación del plano de separación. Utilizando a continuación los ábacos de curvas NZL y NZL¹, correspondientes al valor α hallado o al más próximo, se determinan con mayor exactitud los valores de h o h' , e igualmente ρ_2 , en cada punto del perfil.

Fig. 37.—Ejemplo
de resultados de
interpretación
de las curvas
de SEV de dos
capas mediante
el ábaco NZL¹.



Para valorar la exactitud de este método de interpretación veamos a título de ejemplo un caso práctico de corte eléctrico en el que se tienen ya calculadas las curvas de sondeo. Supongamos que a lo largo del perfil explorado mediante SEV, la superficie de separación de dos medios forma ángulo de $22^\circ 30'$ con la superficie del terreno; ρ_2 permanece constante (1.000 ohm.m) y ρ_1 varía de modo que en los cuatro puntos examinados del perfil 1, 2, 3, 4 (fig. 37) la proporción ρ_2/ρ_1 es igual a 39, 19, 9 y 4. Supongamos que la profundidad verdadera del plano de separación, medida en una perpendicular a él, es $h' = 1; 1,4; 2,2$ y 3. No se reproducen los gráficos de SEV que se obtienen mediante los datos indicados, pues son fáciles de llevar al impreso logarítmico de los correspondientes ábacos NZL¹. Supongamos que no se conoce con certeza el ángulo de buzamiento α y que fijamos arbitrariamente un ángulo aproximado de 30° , es decir, que

cometemos un error en su valor de + 33%. Utilizando las curvas NZL¹ para $\alpha = 30^\circ$, determinados para el punto 1, $h' = 1,12$ y $\rho_2/\rho_1 = \infty$ (para coincidencia de las curvas hay que prestar atención tanto a la parte inicial como a la media de la curva). Del mismo modo hallamos el valor de h' y ρ_2/ρ_1 para los demás puntos de SEV:

Punto 1	$h' = 1,12$	$\rho_2/\rho_1 = \infty$
Punto 2	$h' = 1,5$	$\rho_2/\rho_1 = 39$
Punto 3	$h' = 2,4$	$\rho_2/\rho_1 = 11$
Punto 4	$h' = 3,2$	$\rho_2/\rho_1 = 4$

Trazando arcos con centro en estos puntos, encontraremos la posición más probable de la tangente común a los arcos. Esta tangente representa la incógnita del límite de separación de las dos capas. Hallamos, mediante este dibujo, que el ángulo de inclinación es $\alpha = 24^\circ$.

De este modo, con un error en la valoración inicial del ángulo de inclinación de +33%, el error en el resultado final queda reducido a un +7%. El error en la determinación de la profundidad, como vemos, para los distintos valores de ρ_2/ρ_1 , oscila entre +12 y +7%.

Con este valor hallado de $\alpha = 24^\circ$ y mediante una segunda interpretación de las curvas de SEV, pero ahora ya con los ábacos NZL correspondientes a este valor o a otro próximo a él, se puede obtener un valor más exacto de ρ_2/ρ_1 .

Tal es el procedimiento que se puede recomendar para la interpretación de las curvas de SEV de dos capas, en el caso de límite de separación inclinado, cuando los parámetros α y ρ_2 son desconocidos.

Observamos que si hubiéramos interpretado las curvas de SEV en el perfil examinado, suponiendo que el límite de separación en cada uno de los puntos fuera horizontal ($\alpha = 0$), habríamos obtenido un valor de $\alpha = 20^\circ$. El error relativo en la determinación del ángulo de inclinación sería aproximadamente del 12%; en la determinación de la profundidad del plano de separación habríamos cometido errores del 20 al 10%.

Los valores obtenidos caracterizarán errores en la interpretación de las curvas de SEV en caso ideal. El corte geoelectrico corresponde a un caso teórico, las medidas están realizadas con gran precisión y las curvas de SEV no están sometidas a influencia ajena al problema planteado. En la realidad es difícil encontrar tales condiciones. Por ello, los errores de interpretación pueden ser bastante mayores que los indicados.

El estudio de los errores cometidos al interpretar las curvas de SEV de dos capas realizado sobre límite de separación inclinado, como si la estratificación en cada punto de SEV fuera horizontal, nos conduce a lo siguiente:

1.º) Los valores de ρ_2/ρ_1 obtenidos son sensiblemente más bajos que los verdaderos. Los errores aumentan al

mismo tiempo que ρ_2/ρ_1 , y sobre todo con el valor del ángulo de inclinación α .

- 2.º) Los errores en la determinación de la profundidad del plano de separación, en todos los casos, tienen signo negativo (las profundidades resultan disminuidas); como era de esperar, los errores, a igualdad de las restantes condiciones, crecen al aumentar el ángulo de inclinación α .
- 3.º) En el valor del error, influye no sólo el ángulo α , sino también la relación ρ_2/ρ_1 ; para un mismo ángulo α , los errores disminuyen al hacerlo ρ_2/ρ_1 . Esta influencia es menos visible al aumentar α .
- 4.º) Para $\rho_2/\rho_1 = \infty$, el orden del valor relativo de error en la determinación de h , corresponde con el valor de α . Así, para $\alpha = 22^\circ 30'$ el error es de casi 20%; para $\alpha = 45^\circ$ es de un 41%, etc. Esto permite, en el caso de conocer el valor del ángulo de inclinación del plano de separación y para $\rho_2 = \infty$, valorar de antemano el orden de magnitud del error, al utilizar en la interpretación de las curvas de SEV el ábaco normal de dos capas.
- 5.º) Si en los resultados de la interpretación de las curvas de SEV mediante el ábaco normal de dos capas se considera, no la profundidad h medida en la vertical a la superficie, sino la h' medida en una perpendicular al plano de separación inclinado, entonces los errores relativos de profundidad son sensiblemente menores que en el primer caso.

Si las curvas de SEV, para un corte de dos capas con plano de separación inclinado se interpretan mediante los ábacos NZL o NZL¹, sin conocer de antemano el ángulo de buzamiento α , entonces sobre los errores del valor de la profundidad del horizonte de apoyo al utilizar en la interpretación las curvas de estos ábacos, se puede decir lo siguiente: °

- 1.º) El error positivo o negativo en el valor de α produce errores, en la determinación de la profundidad del plano de separación, del mismo signo.
- 2.º) Los errores en la determinación de la profundidad, en general son bastante menores que los introducidos en el valor de α . Para ángulos que no sobrepasen los 30° los errores en la determinación de h son, en porcentaje, la mitad del error en la determinación de α . Para ángulos grandes, se observan errores aproximadamente del mismo orden para h y α .
- 3.º) Con ángulos α iguales o menores de 45° se mantiene la tónica general de disminución del error al disminuir ρ_2/ρ_1 .
- 4.º) Los errores en la determinación de h' , a igualdad de condiciones, son bastante menores que los errores en la determinación de h , especialmente para ángulos grandes ($\alpha \geq 45^\circ$).

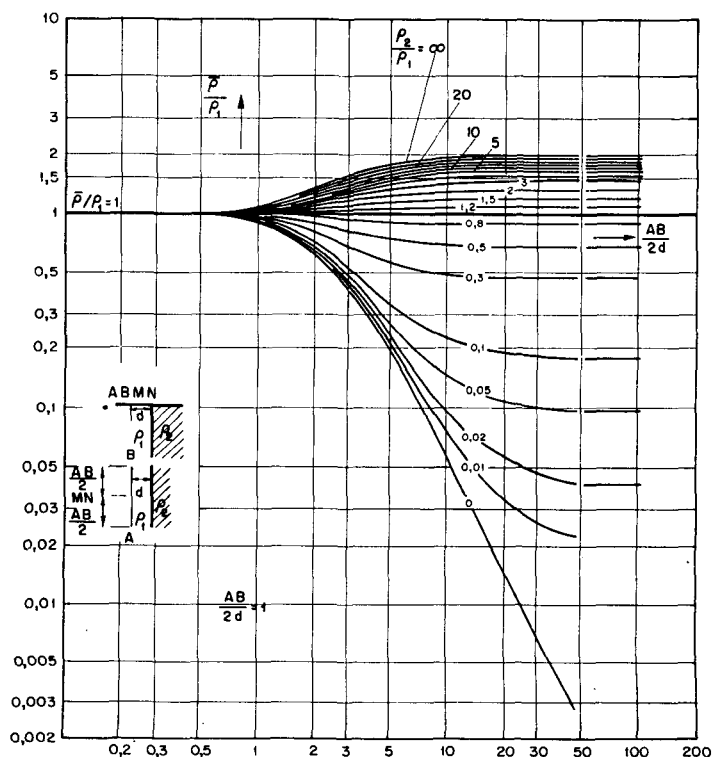
Sobre los errores investigados se puede sacar la siguiente conclusión práctica: Para la interpretación de las curvas de dos capas de SEV, en caso de límite de separación inclinado, si no son conocidos exactamente ninguno de los parámetros del corte (α o ρ_2) es mejor utilizar antes los ábacos NZL¹ que los NZL, es decir, es mejor determinar antes la profundidad h' del plano de separación medida por la perpendicular al mismo. En este caso, incluso cuando el error en la valoración inicial de α es grande (hasta $\pm 50\%$), el resultado de la interpretación nos lleva a una determinación rápida del valor de la profundidad del plano de separación y de su ángulo de inclinación. Para esta interpretación hay que disponer de suficiente cantidad de sondeos.

10. Curvas de SEV en las proximidades del límite de separación vertical de dos medios

Si reunimos todas las curvas de los ábacos NZL⁰, calculadas para $\alpha = 90^\circ$, y las completamos con las gráficas calculadas para este mismo caso para valores de $\rho_2/\rho_1 < 1$, obtendremos un ábaco que no se diferencia del denominado CV-2S (fig. 38), que se incluye en la colección.

El ábaco CV-2S corresponde a las curvas de sondeo con alineación de electrodos AB paralela al contacto vertical de dos medios. La rama ascendente de las curvas, para $\rho_2/\rho_1 > 1$, tiende suavemente a determinados valores asintóticos $\bar{\rho} < \rho_2$ (por ejemplo, en caso de $\rho_2/\rho_1 = \infty$ este valor es igual tan sólo a $2\rho_1$). Para $\rho_2/\rho_1 < 1$, la rama descendente de la gráfica baja bastante bruscamente y alcanza valores asintóticos relativamente bajos, de asíntota $\bar{\rho} > \rho_2$ (por ejemplo, para $\rho_2 = 0,01 \cdot \rho_1$, $\bar{\rho} \approx 0,02 \rho_1$). Examinemos ahora el aspecto de las curvas teóricas de SEV en el caso de

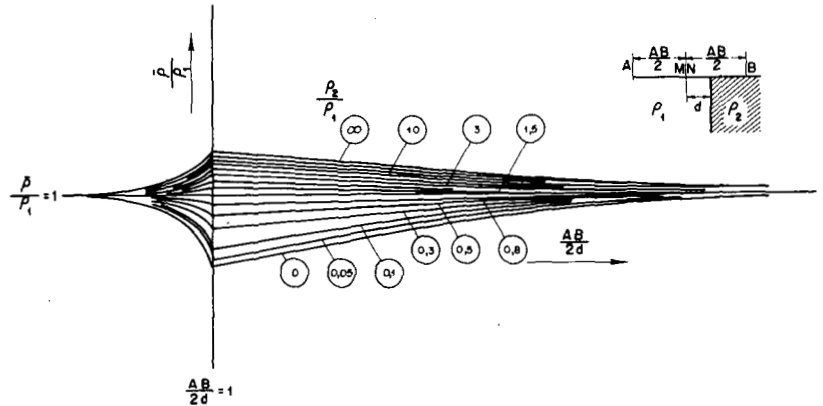
Fig. 38.—Ábaco de curvas de SEV próximos al límite de separación vertical de dos medios (ábaco CV-2S). Alineación AB paralela a la línea de afloramiento superficial del plano de contacto.



límite vertical de separación de dos medios con alineación de electrodos perpendicular a este contacto.

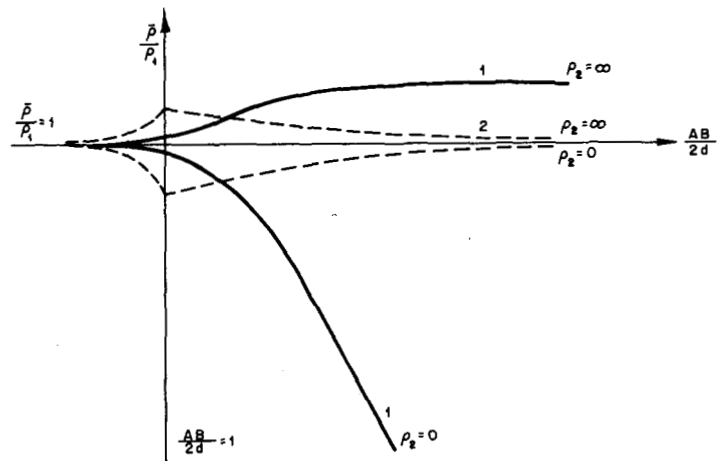
El ábaco (CV-3S) de curvas calculadas de SEV corresponde a medios con diferentes relaciones ρ_2/ρ_1 , mayores y menores que la unidad (fig. 39). En el eje de abscisas aquí, como en los

Fig. 39.—Ábaco de curvas de SEV próximos al límite de separación vertical de dos medios (ábaco CV-3S). La alineación AB es perpendicular a la línea de afloramiento del plano de contacto sobre la superficie del terreno.



ábacos NZL¹, se tienen los valores $AB/2d$, siendo d la distancia desde el centro del dispositivo a la línea de afloramiento del plano de contacto.

Fig. 40.—Comparación de las curvas de SEV con alineación AB paralela y perpendicular a la línea de afloramiento del contacto vertical, sobre la superficie del terreno. 1—AB paralela a la línea de afloramiento del contacto vertical; 2—AB perpendicular a la línea de afloramiento del contacto vertical.



Las curvas de este ábaco son bastante parecidas entre sí, a pesar de la gran diferencia de valores de ρ_2/ρ_1 (desde 1,5 a ∞ y desde 0 a 0,8). Ello confirma la impresión previa de que la resistividad ρ_2 no influye demasiado en este caso en los valores de la resistividad aparente. El contacto vertical empieza a influir visiblemente en la gráfica, haciendo crecer la resistividad aparente (para $\rho_2/\rho_1 > 1$) o haciendo descender su valor (para $\rho_2/\rho_1 < 1$) cuando $AB/2d$ es del orden de 0,5 d.

El valor más alto (para $\rho_2/\rho_1 > 1$) o más bajo (para $\rho_2/\rho_1 < 1$) de $\bar{\rho}/\rho_1$, se obtiene al pasar el electrodo de alimentación por la línea de afloramiento del plano de separación ($AB/2d = 1$). Con $\rho_2 = \infty$, el valor máximo de $\bar{\rho}/\rho_1$ es del orden de 1,45 y el mínimo, para $\rho_2 = 0$, del orden de

0,55. Al aumentar la separación del dispositivo electródico, el valor de $\bar{\rho}$ se aproxima asintóticamente a ρ_1 . Al interpretar curvas de SEV correspondientes a este caso se puede, por la situación del máximo (o mínimo) en la gráfica, juzgar sobre la presencia de un contacto vertical de las rocas y el lugar de afloramiento del mismo sobre el terreno.

Para poner de manifiesto claramente cómo se diferencian las curvas de SEV realizadas en un mismo punto, con alineaciones perpendiculares y paralelas a la línea de afloramiento del plano vertical de separación de los medios, se han dibujado en la figura 40 las curvas, sacadas de los correspondientes ábacos, para los valores extremos de ρ_2/ρ_1 (∞ y 0).

11. Ejemplos de aplicación práctica de los ábacos de curvas de SEV de dos capas

Los ábacos de curvas de SEV de dos capas se pueden utilizar no sólo para determinar la profundidad del horizonte de apoyo, sino también para resolver otros problemas prácticos relacionados con la exploración eléctrica del corte de dos capas.

Supongamos que se quiere calcular la variación de la resistividad aparente $\bar{\rho}$ obtenida por perfilaje, con dispositivo AMNB de separación prefijada, si, en caso de ser constantes los valores ρ_1 y ρ_2 el espesor de la primera capa crece desde un extremo a otro de la línea investigada. Esta situación se encuentra, por ejemplo, cuando se presenta una subida gradual del relieve en el terreno que exploramos. Supongamos que en tres puntos consecutivos de la línea del perfil (fig. 41)

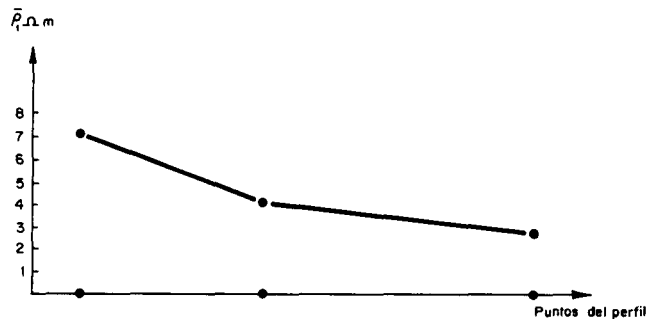
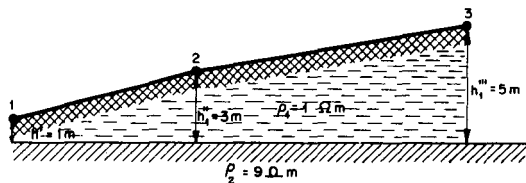


Fig. 41.—Perfil de resistividades aparentes para horizonte de apoyo horizontal y cota variable de la superficie del terreno. $AB/2 = 20 h_1$.



el espesor de la primera capa h_1 , en unidades relativas, es de $h_1' = 1$; $h_1'' = 3$; $h_1''' = 5$. Asimismo, $\rho_1 = 1$ y la relación de resistividades entre la primera y segunda capa también permanece constante, $\rho_2/\rho_1 = 9$. Supongamos que el perfilaje se realiza con dispositivo AMNB, con $AB/2 = 20 h_1$ y MN suficientemente pequeño. El problema del cálculo de la

variación de la resistividad aparente $\bar{\rho}$ en los puntos indicados, se resuelve fácilmente con ayuda de los ábacos de curvas de dos capas. Se debe colocar un impreso logarítmico sobre el ábaco correspondiente y hacer que coincidan el origen de coordenadas de éste sucesivamente con cada uno de los puntos dados (h_1, ρ_1) , colocados previamente sobre este impreso. Calcando, manteniendo paralelos los ejes del ábaco y del impreso, la curva del ábaco correspondiente al parámetro $\rho_2/\rho_1 = 9$ obtendremos en cada uno de los puntos explorados la gráfica de SEV correspondiente a las condiciones expuestas. La ordenada del punto de intersección de esta gráfica con la línea del impreso correspondiente al valor dado, $AB/2$ (en nuestro ejemplo, $AB/2 = 20$), indica el valor de la incógnita $\bar{\rho}$. El valor de $\bar{\rho}$ será de 7, 4 y 2,8 ohm.m, respectivamente.

De este modo, utilizando el ábaco de curvas de dos capas, se puede, para los valores dados de h_1, ρ_1, ρ_2 , obtener la curva de SEV y determinar el valor de la resistividad aparente para cualquier dispositivo eléctrico AB.

Además del ábaco normal de dos capas, se pueden utilizar para estas determinaciones los ábacos NZL, si sabemos de antemano que el ángulo de inclinación del plano de separación de los dos medios tiene un valor alto ($\alpha > 15^\circ$ a 20°). Utilizando, por ejemplo, en el caso de $\alpha = 22^\circ 30'$ y $\rho_2 = \infty$, el ábaco NZL-11, obtendremos para estas mismas profundidades relativas y $AB/2 = 20 h_1$, la curva indicada en la figura 42 (trazos).

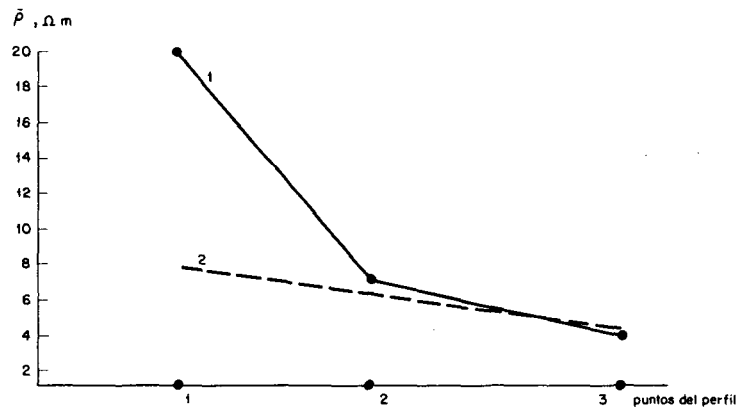
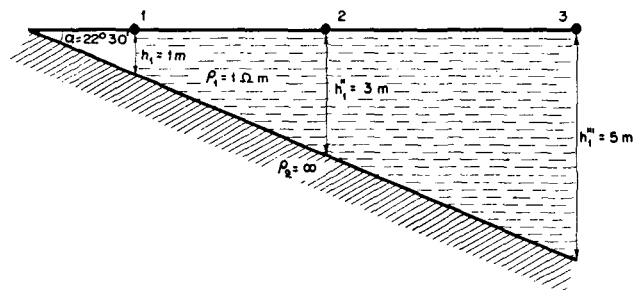


Fig. 42.—Perfil de resistividades aparentes para horizonte de apoyo formando ángulo de $22^\circ 30'$ con la superficie del terreno $\frac{AB}{2} = 20h_1$.
 1 — Curva $\bar{\rho}$ obtenida mediante el ábaco normal de dos capas.
 2 — Curva $\bar{\rho}$ obtenida mediante el ábaco NZL.



Si para la determinación de $\bar{\rho}$ hubiéramos supuesto que el límite de separación era horizontal en cada punto de la exploración entonces, al utilizar el ábaco normal de dos capas,

habríamos obtenido la curva de resistividades aparentes, expuesta en la figura 42 con línea continua. Como vemos, para grandes profundidades relativas del horizonte de apoyo, el valor de $\bar{\rho}$ se diferencia poco en las dos curvas. Pero para profundidades pequeñas, se diferencian bastante.

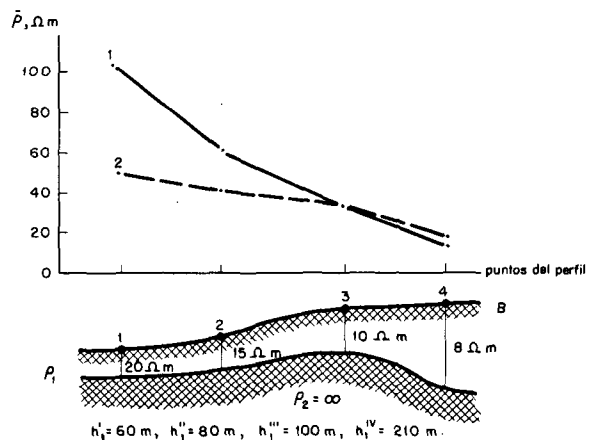
Veamos un ejemplo más. Supongamos que se pide estudiar, utilizando perfilaje con dispositivo AMNB para $AB = 600$ m, la línea de contacto de un potente paquete de rocas de resistividad muy alta ($\rho_2 = \infty$) y espesor 60-100 m, que yace bajo aluviones de conductividad variable (fig. 43). El espesor de los aluviones h_1 , crece gradualmente de Oeste a Este al mismo tiempo que la cota del terreno, mientras que la resistividad ρ_1 , disminuye en esta dirección de 20 a 15 ohm.m en el ala occidental, hasta 10 ohm.m en la parte arqueada y 8 ohm.m en el ala oriental. La parte arqueada del plegamiento yace a 100 m de profundidad, la parte Oeste a 60-80 m y la parte Este a 210 m.

Supongamos que sobre este terreno se han efectuado cuatro SEV (fig. 43). Utilizando el ábaco de dos capas, es fácil construir las curvas de SEV, que se obtienen en los puntos indicados. Estas curvas se exponen en la figura 44 a. El valor de $\bar{\rho}$, sacado de estas curvas, para una separación de $AB/2 = 300$ m, es de 102 ohm.m en el punto 1; en el punto 2 de 60 ohm.m; en el punto 3 de 32 ohm.m y en el punto 4 de 16 ohm.m.

Fig. 43, 1 — Perfil de resistividades aparentes en caso de una subida del horizonte de apoyo con espesor y resistividad del recubrimiento variables.

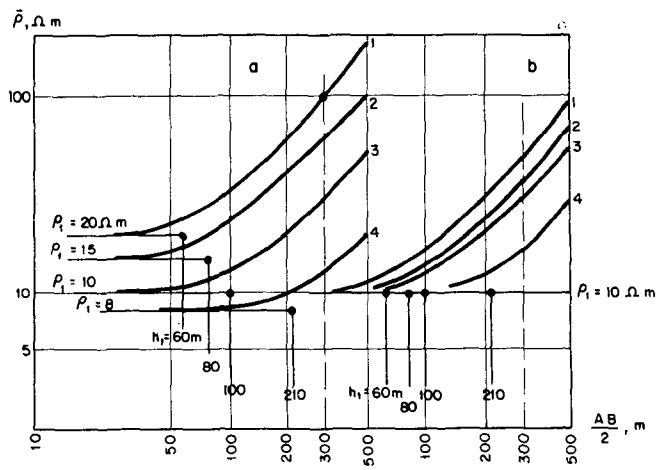
$$\frac{AB}{2} = 600 \text{ m;}$$

2 — El mismo caso para resistividad constante e igual a $\rho_1 = 10 \Omega \cdot \text{m}$.



Representando estos valores en forma gráfica (fig. 43), vemos que en este gráfico no se refleja la elevación de la roca, apreciándose sólo la bajada continua de $\bar{\rho}$ de Oeste a Este. Es decir, en las condiciones indicadas, el dispositivo AB-600 m, no puede utilizarse para la delimitación del plegamiento. Supongamos $\rho_1 = 10$ ohm.m en todos los puntos de la investigación. Entonces las curvas de SEV tendrán un aspecto como el indicado en la fig. 44 b, y en el gráfico $\bar{\rho}$ estaría representado por la curva de puntos (fig. 43). Este gráfico, igual que el anterior, tampoco señalaría el plegamiento. Es fácil ver que la ejecución de perfiles con dispositivo de otra medida cualquiera fracasaría igualmente. El problema de la

Fig. 44.—Curvas de SEV para el corte geoelectrico de la fig. 43.
 a—Curvas de SEV para h_1 y ρ_1 variables;
 b—Curvas de SEV para h_1 variable y ρ_1 constante e igual a $10 \Omega \cdot m$.

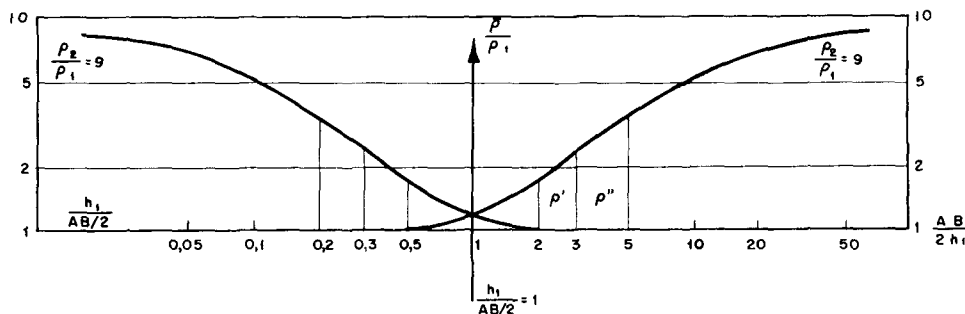


determinación de la estructura, en el caso que examinamos, tan sólo podría resolverse mediante SEV.

La determinación del valor de la resistividad aparente, que puede obtenerse mediante perfiles con un dispositivo de medida de longitud dada, para el caso de corte de dos capas caracterizado por los valores ρ_1 y ρ_2 y la profundidad de la superficie de separación, puede hacerse de forma más sencilla.

Cada una de las curvas del ábaco normal de dos capas, como ya sabemos, caracteriza, para valores dados de ρ_1 y ρ_2 , la variación de la resistividad aparente $\bar{\rho}$ en función de la relación $AB/2$ (valor de la semi-separación de electrodos) al espesor h_1 de la primera capa. A cada una de las relaciones $AB/2h_1 = 1$, $AB/2h_1 = 2$, etc., corresponde un valor calculado de la resistividad aparente ($\bar{\rho}'$, $\bar{\rho}''$, etc.) que depende, para ρ_1 y ρ_2 dados sólo de esta relación (fig. 45). Supongamos que ahora la semiseparación $AB/2$ permanece fija y el espesor de la capa h_1 varía de un punto a otro. ¿Qué aspecto tendrá en este caso la curva que expresa la dependencia entre $\bar{\rho}$ y la relación $h_1/(AB/2)$?

Fig. 45.—Cálculo de h_1 por los valores de $\bar{\rho}$, separación AB de electrodos y ρ_1 y ρ_2 dados con ayuda de la simetría de la curva de SEV del ábaco de dos capas.



Hagamos coincidir el eje $AB/2h_1 = 1$ del ábaco de dos capas con el eje del impreso logarítmico correspondiente al indicado $AB/2$ y el eje $\bar{\rho}/\rho_1 = 1$ con el eje $\bar{\rho} = \rho_1$ del impreso.

Supongamos que h_1 varía, adquiriendo sucesivamente valores $AB/2$, $AB/4$, $AB/6$, etc. Para $h_1 = AB/2$ la relación

$h_1/(AB/2) = 1$ y por consiguiente la resistividad aparente será $\bar{\rho}$; para $h_1/(AB/2) = 1/2$, la relación anterior será igual a 2 y, por tanto, la resistividad aparente será igual a $\bar{\rho}^2$, etc. Contruyendo para estos puntos la relación gráfica, entre $\bar{\rho}$ y $h_1/(AB/2)$, obtendremos una curva que será simétrica de la curva que relaciona a $\bar{\rho}$ y $(AB/2)/h_1$. De aquí se deduce que, para poder obtener las gráficas que expresan la relación entre $\bar{\rho}$ y h_1 , para valor constante de $AB/2$ y valores conocidos de ρ_1, ρ_2 , será suficiente girar la curva correspondiente del ábaco de dos capas, 180° respecto al eje $AB/2h_1 = 1$, y suponer que este eje es la recta $h_1/(AB/2) = 1$ y el eje de abscisas trazado no el $AB/2h_1$, sino su inverso. Utilizando este ábaco inverso de dos capas y conocidos ρ_1, ρ_2 y la semiseparación de electrodos indicada, $AB/2$, es fácil hallar el valor de $\bar{\rho}$ en función del espesor variable h_1 , y, recíprocamente, determinar el espesor h_1 en función de los valores obtenidos de $\bar{\rho}$, en los puntos indicados. Para ello es suficiente colocar el impreso logarítmico sobre el ábaco, haciendo coincidir el eje vertical del ábaco con la línea vertical del impreso que corresponde al valor conocido de la semiseparación de electrodos $AB/2$, y el eje de abscisas con la línea $\bar{\rho} = \rho_1$ del impreso; utilizando la curva del ábaco correspondiente a la relación conocida ρ_2/ρ_1 , determinaremos directamente sobre el impreso el valor incógnita h_1 o ρ_1 .

Por este método es fácil pasar de los mapas o perfiles de resistividad aparente obtenidos en el estudio de un terreno de dos capas con ρ_1 y ρ_2 constantes, a los mapas o perfiles de profundidad de la misma zona.

En la práctica de la exploración eléctrica se tiene un ejemplo interesante de construcción de mapas de profundidad a partir de mapas de resistividad, en la investigación de los karsts formados en la cuenca de Donetz. El problema consistía en delimitar, a efecto de aprovechamiento de la caliza como material fundente para la industria metalúrgica, las zonas karstificadas. Las calizas de la región poseen una resistividad alta, pero las rocas que rellenan los embudos kársticos son bastante conductoras ($\rho_1 = 15$ a 20 ohm.m).

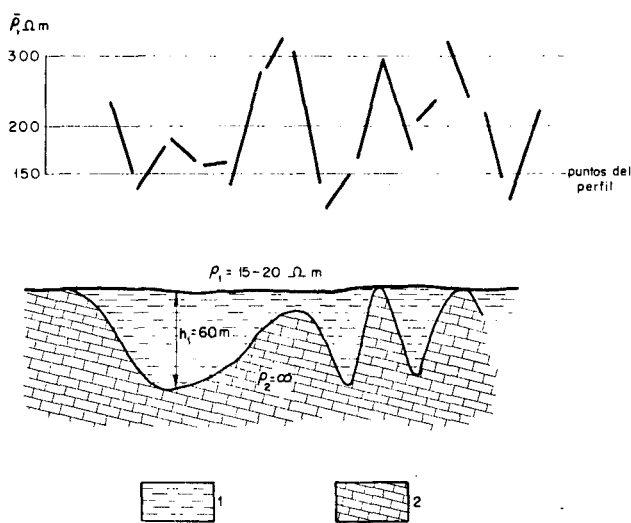
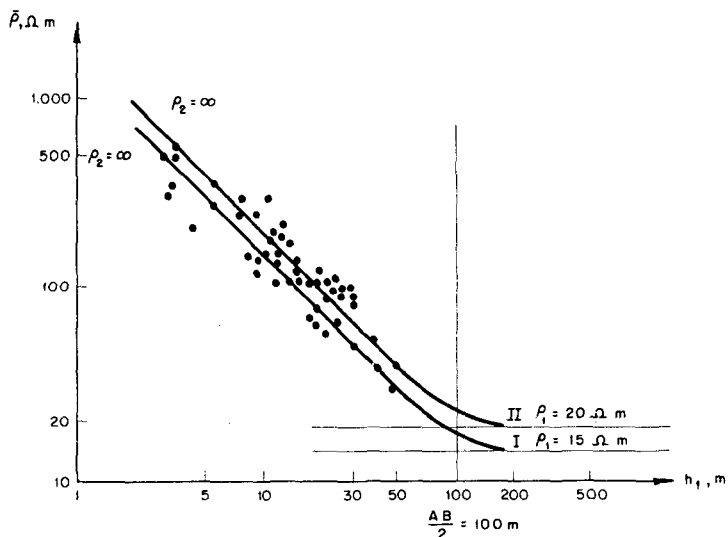


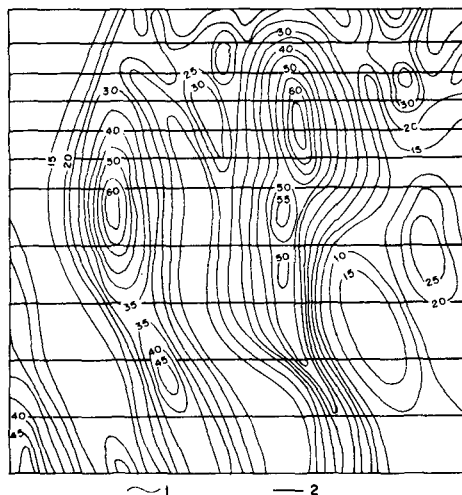
Fig. 46.—Perfil de resistividades aparentes sobre la superficie karstificada de las calizas (según A. I. Zhelezniak).
 1.—Aluviones;
 2.—Calizas.

Fig. 47.—
Determinación de ρ_1 mediante los datos de sondeos mecánicos y del ábaco inverso de dos capas.



La exploración eléctrica con dispositivos AMONB para $AB = 200 \text{ m}$ $OM = ON = 20 \text{ m}$, demostró que con perfiles $\bar{\rho}$ se establecía de modo claro la distribución de las calizas sanas (fig. 46). Se construyeron mapas de resistividades aparentes de los terrenos explorados y después, sobre ellos, y con ayuda del método expuesto anteriormente, se confeccionaron mapas de igual profundidad de las calizas no karstificadas. Este modo de operar permitió simplificar considerablemente el procedimiento y tiempo de sondeos de detalle en la zona investigada.

Fig. 48.—Parte de un mapa de isoprofundidades del recubrimiento de calizas (según Zhelezniak, mediante los resultados de los perfiles).
1.—Isolnea de profundidad m^2 .
2.—Línea de perfil.



En la práctica para pasar del valor $\bar{\rho}$ a la profundidad h_1 , es necesario conocer la resistividad ρ_1 de la capa superior. En el ejemplo examinado, una serie de pozos existentes en el terreno explorado permitió fijar los límites de variación de la resistividad ρ_1 del modo siguiente: En el impreso logarítmico se señalaron en el eje de abscisas las profundidades h_1 hasta las calizas (en metros) obtenidas por los datos de los pozos y en el eje de ordenadas los valores de $\bar{\rho}$ en el entorno de dichos pozos, para $AB = 200 \text{ m}$ (fig. 47). Después, el impreso con los puntos señalados se superponía al ábaco inverso de

dos capas, haciendo coincidir el eje $h_1/(AB/2) = 1$ del ábaco con el eje $AB/2 = 100$ m. A continuación, el eje del impreso se trasladaba por el eje del ábaco hasta que la curva de SEV del ábaco para ρ_2/ρ_1 ocupaba dos posiciones límites en el impreso próximas a las cuales se agrupaban los puntos señalados. Estas posiciones (curvas I y II) fijadas en el impreso, indicaban unos límites de variación de ρ_1 desde 15 a 20 ohm.m y servían para determinar la profundidad h_1 en función de los valores observados de $\bar{\rho}$. Según en qué pozo caía el punto de medida de $\bar{\rho}$, el valor de h_1 se tomaba de una u otra curva. De este modo se realizaba el paso de los mapas de resistividad a los de profundidad (fig. 48); posteriormente se confirmaban los datos mediante sondeos mecánicos.

Si no existían pozos en el terreno de exploración, el valor de ρ_1 se determinaba con ayuda de SEV poco profundos, realizados espaciadamente sobre la superficie a investigar.

12. Interpretación cualitativa de curvas de SEV de dos capas

En la exploración eléctrica del corte de dos capas y mediante el proceso de interpretación cualitativa de las curvas de SEV se pueden formar perfiles y mapas de resistividades ρ_1 y ρ_2 , de resistividades aparentes para una o varias distribuciones AB y de conductancias longitudinales totales S (si el horizonte de apoyo tiene resistividad infinita).

En este caso de $\rho_2 = \infty$, como sabemos, el valor de la resistividad aparente, indicado por la rama derecha asintótica es

$$\bar{\rho} = \frac{AB}{2} \cdot \frac{\rho_1}{h_1}$$

siendo ρ_1 y h_1 la resistividad y espesor de la primera capa.

Por consiguiente, en los mapas de resistividad aparente a las zonas de valores altos de $\bar{\rho}$, para ρ_1 constante, corresponderán terrenos en que el horizonte de apoyo se acerca a la superficie y, al contrario, a una disminución de $\bar{\rho}$ corresponde un aumento de h_1 , es decir, el hundimiento del horizonte de apoyo. Examinado el ábaco de dos capas, se puede concluir que esto ocurre en todos los casos en que $\rho_2 > \rho_1$.

El mismo ábaco indica que, para $\rho_2 < \rho_1$, las zonas de valor alto de $\bar{\rho}$ corresponden a regiones en que el sustrato está más profundo.

Estas indicaciones son válidas siempre que los parámetros ρ_1 y ρ_2 no varíen. Si el valor de cualquiera de estos parámetros o los dos varían, entonces las variaciones de $\bar{\rho}$, para AB fijo, no corresponderán a las variaciones de la profundidad del horizonte de apoyo. En este caso, se puede llegar a una interpretación falsa de los mapas y perfiles de resistividades aparentes. Para evitar esto, es útil hacer perfiles y mapas de iguales valores de ρ_1 y ρ_2 . Examinándolos, en comparación con los mapas de resistividades aparentes, se puede determinar más exactamente si el aumento o descenso de $\bar{\rho}$ va ligado a

las oscilaciones de la profundidad h_1 del horizonte de apoyo o a las variaciones de los parámetros ρ_1 y ρ_2 .

Para $\rho_2 = \infty$ se forman con frecuencia mapas de conductancia longitudinales, tomando de los impresos de las curvas de SEV el valor de S_1 . Para ρ_1 constante, las variaciones de S_1 van ligadas a las del espesor h_1 hasta el horizonte de apoyo ($\rho_2 = \infty$): a mayor S_1 corresponde mayor profundidad del mismo; a menores valores de h_1 corresponden también menores de S_1 .

Es decir, que, para ρ_1 constante, los mapas de $\bar{\rho}$ y S_1 se interpretan de modo opuesto: los valores altos de $\bar{\rho}$ se corresponden con la subida del horizonte de apoyo de alta resistividad y los valores altos de S_1 a su bajada. Por el contrario, a valores bajos de $\bar{\rho}$ corresponde el descenso del horizonte de apoyo y a valores bajos de S_1 su elevación.

Del mapa S_1 es fácil pasar al mapa de profundidades del horizonte de apoyo, sabiendo que $h_1 = S_1 \cdot \rho_1$ en cada punto de SEV. La profundidad h_1 se puede obtener también directamente tomándola en las curvas de SEV, pues es la abscisa del punto de intersección de la rama asintótica de la curva con el eje $\bar{\rho} = \rho_1$.

2

CORTE ELECTRICO DE TRES CAPAS

Corte eléctrico de tres capas

13. Abacos de curvas de SEV de tres capas

El corte eléctrico de tres capas se presenta cuando dos de ellas, de espesores h_1 y h_2 y resistividades ρ_1 y ρ_2 , descansan sobre una tercera de espesor ilimitado ($h_3 = \infty$) y resistividad $\rho_3 \neq \rho_2$. Esta última se denomina habitualmente horizonte eléctrico de apoyo.

También se incluyen los casos en que, aunque no posea gran espesor, la tercera capa tenga, sin embargo, una resistividad muy alta ($\rho_3 = \infty$) o muy baja ($\rho_3 = 0$) respecto a la de la capa que descansa sobre ella.

Si al corte de dos capas añadimos una tercera, resultarán cuatro tipos de curvas para este corte de tres capas, que se designan habitualmente como tipos H, A, K y Q (fig. 12).

Del mismo modo que en el caso de dos capas, se han calculado para los cuatro tipos resultantes de cortes de tres capas, según la relación entre los parámetros, las curvas teóricas de SEV correspondientes, supuestas las capas homogéneas, isótropas, de extensión ilimitada y dispuestas horizontalmente. Dichas curvas se han agrupado por familias en ábacos denominados de curvas de SEV de tres capas o, más brevemente, ábacos de tres capas, añadiéndose a veces la sigla GP-3 con el número correspondiente.

La resistividad aparente $\bar{\rho}$ depende, en el corte de tres capas, de la longitud del dispositivo electródico de alimentación AB y de los cinco parámetros de las capas, $h_1, \rho_1, h_2, \rho_2, \rho_3$. Dos de estos parámetros, h_1 y ρ_1 , quedan fijados normalmente por la posición de la rama inicial de la curva de SEV. Los tres restantes, desconocidos, se expresan en función de estos dos:

$$\rho_2/\rho_1, \quad \rho_3/\rho_1, \quad h_2/h_1$$

Las curvas de SEV para el caso del corte de tres capas pueden quedar definidas, por tanto, por la función:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}/\rho_1 &= f(\rho_2/\rho_1, \rho_3/\rho_1, h_2/h_1, AB/2h_1) = \\ &= f(\mu_1, \mu_2, \nu_1, AB/2h_1) \end{aligned}$$

siendo

$$\mu_1 = \rho_2/\rho_1, \quad \mu_2 = \rho_3/\rho_1, \quad \nu_1 = h_2/h_1$$

Las curvas calculadas de SEV de tres capas, determinadas por los tres parámetros μ_1 , μ_2 , ν_1 , no pueden quedar representadas gráficamente en un solo ábaco, como era el caso para las del corte de dos capas.

Actualmente existen calculadas curvas de SEV para el corte de tres capas de los cuatro tipos (tabla 5), para cada uno de los siguientes valores de los parámetros, supuestos fijos los dos restantes:

$\mu_1 = 1/39, 1/19, 1/4, 3/7, 2/3, 3/2, 7/3, 4, 9, 19, 39$
(12 variantes).

$\mu_2 = 0, (\rho_2/\rho_1)^2, (\rho_2/\rho_1)^{3/2}, (\rho_2/\rho_1)^{1/2}, 1, \infty$, (6 variantes).

$\nu_1 = 1/9, 1/5, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 5, 9, 24$ (10 variantes).

En total, estas curvas de SEV de tres capas suponen 720 gráficas, que se presentan agrupadas en tres tipos de ábacos:

- 1) variando el parámetro ν_1 .—12 ábacos de 10 curvas cada uno.
- 2) variando el parámetro μ_1 .—10 ábacos de 12 curvas cada uno.
- 3) variando el parámetro μ_2 .—120 ábacos de 6 curvas cada uno.

Las curvas de SEV de cada tipo se agrupan en ábacos según los tres valores diferentes de la resistividad del horizonte de apoyo. Uno para la misma igual a ∞ (curvas de SEV de los tipos H y A) o a 0 (curvas de los tipos Q y K), un segundo ábaco para el caso en que $\rho_3 = \rho_1$ (curvas de los tipos H y K) y un tercero en que ella depende de las resistividades de la segunda y primera capa:

$$\rho_3 = \sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2} \text{ (curvas de los tipos H y K) o } \rho_3 = \sqrt{\rho_2^3 / \rho_1};$$

$$\rho_3 = \rho_2^2 / \rho_1 \text{ (curvas de los tipos Q y A).}$$

TABLA 5

INDICE DE LA COLECCION DE ABACOS DE CURVAS DE SEV DE TRES CAPAS

Tipos de las curvas de SEV	Parámetros de cálculo del corte			Número de curvas de SEV
	ρ_1	$\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$	$\mu_2 = \rho_3 / \rho_1$	
H	1	de 1/39 a 2/3	$\infty; 1; (\rho_2 / \rho_1)^{1/2}$	180
Q	1	de 1/39 a 2/3	0; $(\rho_2 / \rho_1)^{3/2}; (\rho_2 / \rho_1)^2$	180
A	1	de 3/2 a 39	$\infty; (\rho_2 / \rho_1)^{3/2}; (\rho_2 / \rho_1)^2$	180
K	1	de 3/2 a 39	0; $1; (\rho_2 / \rho_3)^{1/2}$	180

A la vista de la resistividad de la segunda capa, es fácil calcular el valor numérico de la resistividad del horizonte de apoyo del ábaco, que depende de ρ_2 y ρ_1 (tabla 6).

Los ábacos con las curvas de SEV calculadas de tres capas se han reunido en colecciones. Hasta el momento se han editado tres de éstas. La primera, editada por la empresa francesa Compañía General de Geofísica, calculada para los valores citados de μ_1 y ν_1 , y μ_2 : 0, $(\rho_2/\rho_1)^2$, 1, ∞ . La colección comprende los ábacos que agrupan las curvas de SEV variando los parámetros μ_1 (40 ábacos) y ν_1 (48 ábacos). Parte de estos ábacos han sido publicados en la revista "Geophysical Prospecting", v. III, n.º 3, septiembre, 1955.

Además de ésta, también comprende otras colecciones agrupadas según el valor inverso de μ_1 ($1/\mu_1 = \rho_1/\rho_2$), para $\mu_2 = \infty$ y 0 (20 ábacos) y respecto al inverso de ν_1 ($1/\nu_1 = h_1/h_2$) para los cuatro valores indicados de μ_2 (48 ábacos). En total, por consiguiente, el conjunto suma 156 ábacos.

TABLA 6
VALORES NUMERICOS, EN LOS ABACOS, DE ρ_3/ρ_1
EN FUNCION DE ρ_2/ρ_1

ρ_2/ρ_1	$\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$		$\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{3/2}$		$\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^2$	
		Tipo de curva		Tipo de curva		Tipo de curva
1/39 = 0,026	0,16	H	0,004	Q	0,0007	Q
1/19 = 0,053	0,23		0,012		0,0028	
1/9 = 0,111	0,33		0,04		0,0121	
1/4 = 0,25	0,50		0,13		0,0625	
3/7 = 0,43	0,65		0,28		0,185	
2/3 = 0,67	0,82		0,55		0,449	
3/2 = 1,50	1,23	K	1,85	A	2,25	A
7/3 = 2,33	1,53		2,56		5,43	
4	2,00		8		16	
9	3,00		27		81	
19	4,36		82,5		361	
39	6,25		242		1521	

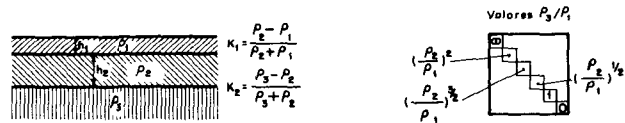
La segunda colección de ábacos de tres capas, editada en el año 1941 por el Trust Geofísico Estatal de la Unión (G.S.G.T.), sirve de complemento a la primera. En ella los ábacos se presentan para 12 valores de μ_1 ; 10 de ν_1 y μ_2 igual a $(\rho_2/\rho_1)^{3/2}$ y $(\rho_2/\rho_1)^{1/2}$.

La colección contiene ábacos en que las curvas de SEV se han agrupado variando μ_1 (20 ábacos), ν_1 (24 ábacos), $1/\nu_1$ (24 ábacos) y μ_2 (120 ábacos) para los seis valores de $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ indicados anteriormente.

La tercera colección de curvas de SEV de tres capas fue publicada por el VSEGEI en el año 1947 como anejo al libro de A. M. Pylaev. En esta colección se incluyen ábacos de las

dos colecciones anteriores, comprendiendo las curvas de SEV en que sólo varía el parámetro $\nu_1 = h_2/h_1$. En ella la serie de curvas de tipo H ha sido completada con ábacos en que μ_1 es igual a 1/100 y 1/300 manteniéndose $\mu_2 = \infty$.

Las curvas calculadas en la colección VSEGEI se presentan de modo distinto que en las dos primeras. En el eje de abcisas se toman los valores $\bar{\rho}/\rho_1$ y en el de ordenadas $AB/2h_1$. Además de esto, todas las curvas de SEV han sido trasladadas de modo que cada una tenga su origen de coordenadas (h_1, ρ_1) . El trazado de las líneas de valores $h_2, S_2 = h_2/\rho_2, T_2 = h_2 \cdot \rho_2$ y otras, en los ábacos, permite obtener estos valores directamente de las gráficas de SEV en el proceso de interpretación.



ABACOS															h_2/h_1
111	49	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	1/9	
	43														
	401														
112	48													1/5	
	39														
	412														
113	49	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154		
	42														
	402														
114	47													1/3	
	3														
	413														
115	46	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166		
	36														
	403														
116	45													1/2	
	6														
	414														
117	44	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178		
	35														
	404														
118	43													1	
	12														
	415														
119	42	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190		
	31														
	405														
120	41													2	
	7														
	416														
121	40	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202		
	15														
	406														
122	39													3	
	4														
	417														
123	38	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214		
	33														
	407														
124	37													5	
	8														
	418														
125	36	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226		
	20														
	34														
	408														
126	35													9	
	38														
	419														
127	34	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238		
	47														
	419														
128	33													24	
	40														
	409														
129	32	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250		
	46														
	45														
	420														
	410														
	44														
	30														
	30														
Abacos	K_1	0,95	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	K_2	
	$\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$	1/39	1/19	1/9	1/4	3/7	2/3	3/2	7/3	4	9	19	39	μ_2	

Fig. 49.—Tabla resumen de curvas calculadas de SEV de tres capas.

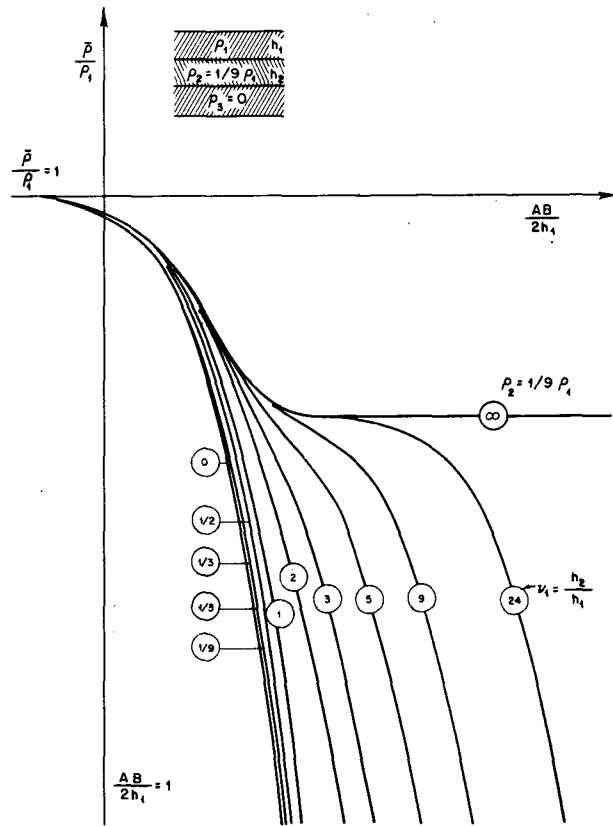


Fig. 50.—Abaco GP-3 n.º 78 de curvas de SEV de tres capas, para $\mu_1 = \frac{1}{9}$ y ν_1 variable; $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1} = 0$

La localización, dentro de la gran cantidad de ábacos existente en una colección, no debe ser difícil. Para el caso de la colección editada por el VSEGEI ello resulta fácil, sin necesidad de aclaraciones complementarias.

Para la mejor localización de los ábacos se tienen, en las dos primeras colecciones, unas tablas generales en las que se dan el número de cada ábaco contenido en las mismas. En la figura 49 se da un cuadro-resumen que sirve de clave para ambas colecciones.

El cuadro está dividido mediante rayados horizontal y vertical principales. A cada una de las diez filas horizontales corresponde un valor dado de $\nu_1 = h_2/h_1$. Estos valores se indican en la columna adicional de la derecha. A cada una de las filas verticales corresponde un valor de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ que viene dado en la última fila adicional de la tabla. En cada uno de los cuadros de la tabla se han dibujado otros seis cuadros pequeños, dispuestos escalonadamente. Estos corresponden a seis valores diferentes de $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$, que a su vez se han definido en el recuadro existente en el margen derecho de la figura.

En dos filas adicionales de la parte superior de la tabla y dos columnas a la izquierda se indica el número del ábaco. Los ábacos correspondientes a la fila más baja (número de dos cifras del 51 al 98 y de tres cifras, del 421 al 444) corresponden a curvas de SEV en que ν_1 es variable y μ_1, μ_2 constantes; los ábacos correspondientes a la fila superior (número de tres cifras, del 251 al 298 y del 471 al 494) corresponden a las mismas curvas, pero variando $1/\nu_1 = h_1/h_2$.

De este modo, si se exige, por ejemplo, localizar ábacos con curvas de SEV en que $\mu_1 = 1/9$, $\mu_2 = 0$ y diferentes valores de ν_1 , se verá, en la tabla que son los del ábaco 78 (fig. 50). Si permaneciendo fijos μ_1 y μ_2 se quisieran las curvas con diferentes valores de $1/\nu_1$, entonces se trataría del ábaco 278 (fig. 51). En estos y otros ábacos análogos hay 12 curvas de SEV. De ellas, diez corresponden a valores prefijados de ν_1 , mientras que los dos extremos corresponden a curvas de dos capas para $\nu_1 = \infty$, $\nu_1 = 0$. Para $\nu_1 = 0$, y, por tanto, $1/\nu_1 = \infty$, se trata del caso en que el espesor de la primera capa es infinitamente grande respecto al de la segunda, en una curva de SEV de dos capas, reduciéndose, por tanto, a $\bar{\rho} = \rho_1$ (ábaco 278).

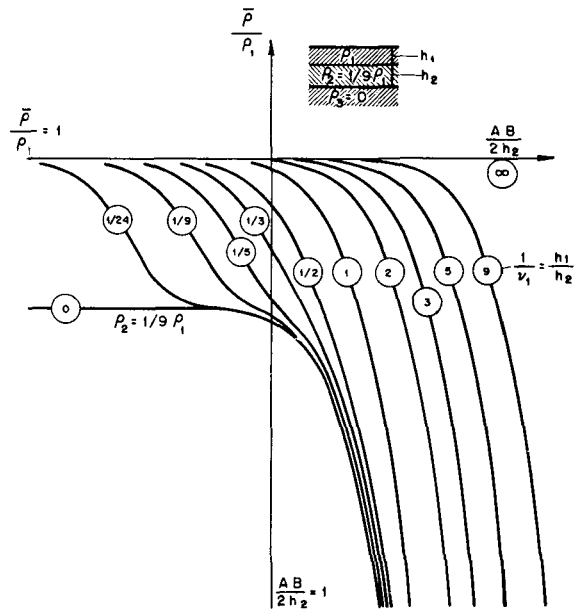


Fig. 51.—Abaco GP-3 n.º 278 de curvas de SEV de tres capas, para $\mu_1 = 1/9$ y $1/\nu_1$ variable; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 0$.

Los ábacos correspondientes a la segunda columna de la parte izquierda de la tabla (del 2 al 50 y del 401 al 420) comprenden curvas de SEV en las μ_1 es variable y μ_2 , ν_1 constantes. En cuanto a los ábacos correspondientes a la primera columna de la izquierda (111-130) agrupan las curvas en que es variable $1/\mu_1 = \rho_1/\rho_2$.

Si, por ejemplo, se desea encontrar el ábaco de curvas de SEV para $\nu_1 = 2$, $\mu_2 = \infty$ y μ_1 variable, el número 16 (fig. 52) satisface estas condiciones; para las mismas condiciones, pero variando $1/\mu_1$, el ábaco será el 121 (fig. 53).

El ábaco 16 contiene 15 curvas de SEV. Doce de ellas para valores preestablecidos de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$; las dos curvas extremas, que corresponden a gráficas de SEV de dos capas, para $\rho_2/\rho_1 = \infty$ y $\rho_2/\rho_1 = 0$ y una curva que también se reduce a otra de dos capas, para $\rho_2/\rho_1 = 1$.

En el ábaco 121 hay 13 curvas de SEV, pues las curvas correspondientes a los valores extremos carecen de sentido en este caso.

Se ve fácilmente que los ábacos indicados por los números (131 a 250) de los cuadros grandes (cruce de las franjas

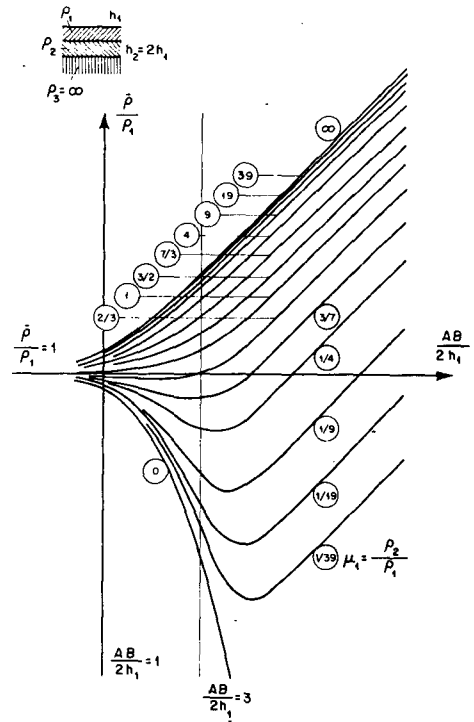


Fig. 52.—Abaco GP-3 n.º 16 de curvas de SEV de tres capas, para $\nu_1 = 2$ y μ_1 variable; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = \infty$.

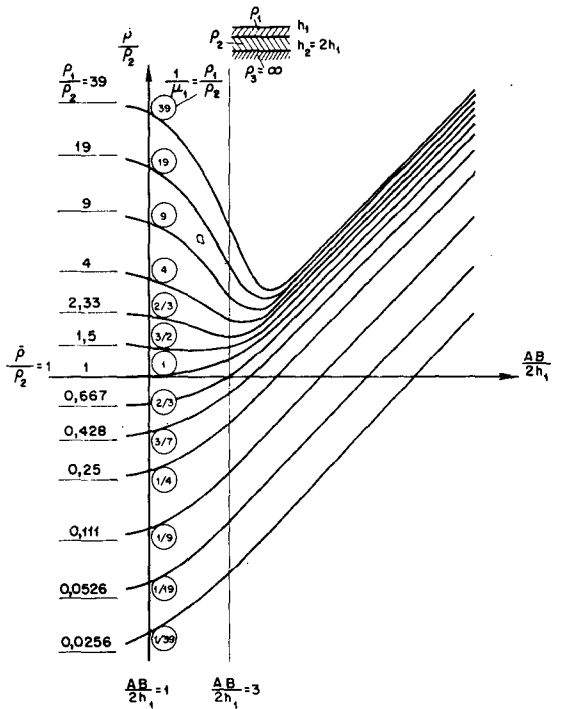


Fig. 53.—Abaco GP-3 n.º 121 de curvas de SEV de tres capas, para $\nu_1 = 2$ y $1/\mu_1$ variable; $\mu_2 = \rho_3/\rho_2 = \infty$.

anchas) de la tabla-resumen agrupan curvas de SEV en que μ_1 , ν_1 son constantes y μ_2 variable. Un ejemplo de tales ábacos de curvas de SEV de tres capas (para el caso $\mu_1 = 4$ y $\nu_1 = 9$) se presenta en la figura 54.

La tabla-resumen pone de manifiesto que cada una de las curvas de SEV de tres capas calculadas, puede localizarse en cuatro ábacos y para $\rho_3 = \infty$ y 0, en cinco. Por ejemplo, la curva en que $\mu_1 = 1/19$, $\nu_1 = 3$, $\mu_2 = 1$, se localiza en los ábacos 55, 255, 5 y 204; la curva en que $\mu_1 = 4$, $\nu_1 = 9$ y $\mu_2 = \infty$, en los ábacos 95, 295, 235, 47 y 127. En la

interpretación del problema planteado se facilita de este modo la selección del ábaco más conveniente. La colección GSGT comprende los ábacos con números 131-250 y superiores al 400.

Para el trabajo normal de interpretación práctica, sólo suelen necesitarse los ábacos de curvas de tres capas en que $\nu_1 = h_2/h_1$ es variable y $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ son constantes. Por consiguiente, es de utilidad disponer de unas tablas sencillas que permitan la localización rápida de los ábacos necesarios entre el gran número existente en ambas colecciones. Tales tablas (tabla 7) comprenden 72 ábacos, que suelen ser los más usados en la práctica. La localización del ábaco buscado en esta tabla no necesita explicación.

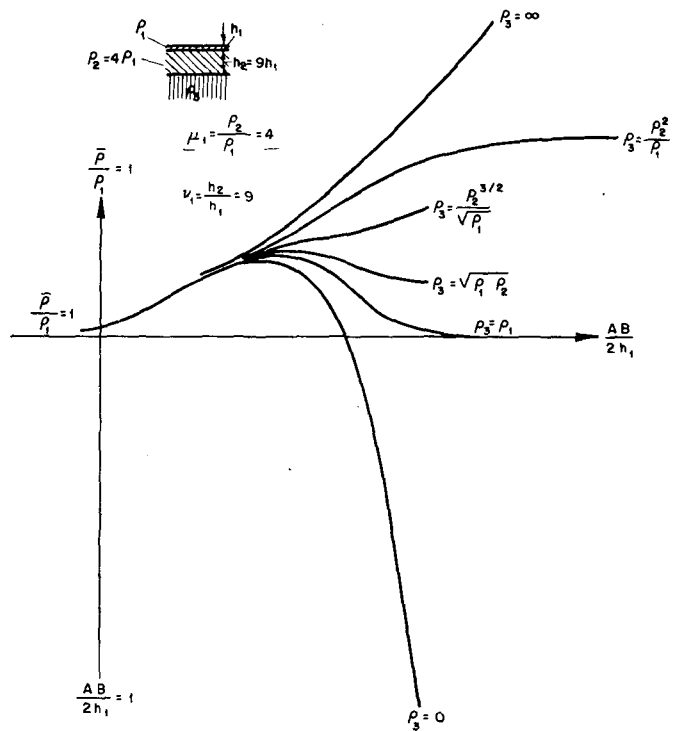


Fig. 54.—Ábaco GP-3 n.º 235 de curvas de SEV de tres capas, para $\mu_1 = 4$; $\nu_1 = 9$ y $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ variable.

14. Representación gráfica de las curvas de tres capas. Puntos y ábacos auxiliares para las curvas de tipo H, A, K y Q. Nomogramas de Bogdanov

Los ábacos de curvas de SEV de dos y tres capas, son la base de la interpretación cuantitativa de los resultados de los sondeos eléctricos verticales. Sin embargo, y a pesar del número de curvas de SEV calculadas, y aún siendo posible la interpolación entre las mismas, no es factible agotar toda la variedad de cortes eléctricos que pueden encontrarse en la práctica.

Ello ha obligado a encontrar el medio de obtener curvas de SEV que permita, de modo relativamente fácil, rápido y con suficiente precisión práctica, construir curvas de SEV para cualquier corte que haya que investigarse. Los métodos correspondientes se denominan gráficos. Dado que sólo se trata de construir curvas de SEV de modo aproximado, no puede pretenderse sustituir con ello a las calculadas teóricamente. No obstante, resultan satisfactorias, sin grandes pérdidas de tiempo y con poco trabajo, desde el punto de vista de los resultados prácticos.

Veamos en pocas palabras el modo de obtener gráficamente las curvas en el corte de tres capas, suficientemente detallado en la literatura existente.

Sea una capa de espesor h y resistividad ρ . La conductancia longitudinal S y la resistencia transversal T de esta capa se expresan, como se sabe, por:

$$S = h/\rho \quad ; \quad T = h \cdot \rho$$

de donde

$$h = \sqrt{ST} \quad ; \quad \rho = \sqrt{T/S}$$

TABLA 7

CUADRO SINOPTICO DE ABACOS DE CURVAS DE SEV DE TRES CAPAS EN LOS QUE $v_1 = h_2/h_1$ ES VARIABLE

NUMERO DEL ABACO	86	56	432	444	68	80	85	55	431	443	67	79
ρ_2/ρ_1	1/39=0,026						1/19=0,053					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0
	∞	1	0,161	0,004	0,0007	0	∞	1	0,23	0,012	0,0028	0
TIPO DE CURVA	H	H	H	Q	Q	Q	H	H	H	Q	Q	Q

NUMERO DEL ABACO	82	52	428	440	64	76	81	51	427	439	63	75
ρ_2/ρ_1	3/7=0,43						2/3=0,67					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0
	∞	1	0,65	0,28	0,185	0	∞	1	0,82	0,55	0,449	0
TIPO DE CURVA	H	H	H	Q	Q	Q	H	H	H	Q	Q	Q

NUMERO DEL ABACO	95	71	435	423	59	89	96	72	436	424	60	90
ρ_2/ρ_1	4						9					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0
	∞	8	16	2	1	0	∞	81	27	3	1	0
TIPO DE CURVA	A	A	A	K	K	K	A	A	A	K	K	K

Conocidos los valores S y T de la capa, es fácil calcular su espesor y resistividad. Por tanto, prefijado uno de los valores S y T , el espesor y la resistividad de la capa correspondiente quedan relacionados entre sí.

Si se consideran y y ρ como variables, las igualdades $h/\rho = S$, $h \cdot \rho = T$, se representan, en un sistema de coordenadas rectangulares, por una recta que pasa por el origen y una rama de hipérbola equilátera, respectivamente. En un sistema de coordenadas con escala bilogarítmica, la primera igualdad $\log h - \log \rho = \log S$ representa una recta que forma con el eje de abscisas un ángulo de 45° y corta en este último un segmento igual a $\log S$. En cuanto a la segunda

TABLA 7

CUADRO SINOPTICO DE ABACOS DE CURVAS DE SEV DE TRES CAPAS EN LOS QUE $v_1 = h_2/h_1$ ES VARIABLE

NUMERO DEL ABACO	84	54	430	442	66	78	83	53	429	441	65	77
ρ_2/ρ_1	1/9=0,111						1/4=0,025					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0	∞	1	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	0
	∞	1	0,33	0,04	0,12	0	∞	1	0,50	0,13	0,0625	0
TIPO DE CURVA	H	H	H	Q	Q	Q	H	H	H	Q	Q	Q

NUMERO DEL ABACO	93	69	433	421	57	87	94	70	434	422	58	88
ρ_2/ρ_1	3/2=1,5						7/3=2,33					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0
	∞	2,25	1,85	1,23	1	0	∞	5,43	2,56	1,53	1	0
TIPO DE CURVA	A	A	A	K	K	K	A	A	A	K	K	K

NUMERO DEL ABACO	97	73	437	425	61	91	98	74	438	426	62	92
ρ_2/ρ_1	19						39					
$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1/2}$	1	0
	∞	361	82,5	4,36	1	0	∞	1521	242	6,25	1	0
TIPO DE CURVA	A	A	A	K	K	K	A	A	A	K	K	K

igualdad ($\log h + \log \rho = \log T$) representa una recta que forma con el eje de abscisas un ángulo de 135° e intercepta en dicho eje un segmento igual a $\log T$.

Estas rectas son los lugares geométricos de los puntos cuyas coordenadas son el espesor y resistividad de las capas que tienen igual valor de S o T . Las coordenadas del punto de intersección de estas rectas corresponden al espesor y resistividad de la capa con valores S y T dados. Es decir, se puede, de este modo utilizar el impreso bilogarítmico para, dados S y T , hallar fácilmente los parámetros del corte. Basta para ello trazar segmentos de valor numérico igual a S y T del eje de abscisas a partir del origen, y desde el punto extremo de cada uno de ellos una recta con ángulo, respectivamente, de 45° y 135° . Las coordenadas de su intersección son los valores buscados, h y ρ .

Veamos ahora el caso de una serie de m capas. En tales condiciones, como se sabe, S y T vienen dados por:

$$S = \sum_{i=1}^m S_i = \sum_{i=1}^m h_i / \rho_i; \quad T = \sum_{i=1}^m T_i = \sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i$$

Los puntos de intersección de las rectas trazadas por S y T determinan el espesor h_e y resistividad ρ_e de una capa con datos equivalentes a los del conjunto anterior:

$$h_e = \sqrt{ST} = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i \cdot \sum_{i=1}^m T_i}$$

$$\rho_e = \sqrt{T/S} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m T_i) / (\sum_{i=1}^m S_i)}$$

Es fácil comprobar que este espesor h_e será mayor que el espesor total $\sum_{i=1}^m h_i$ de la serie de capas.

La obtención de los parámetros de la capa equivalente a dos o más capas dadas, tiene gran valor para la determinación gráfica de las curvas de SEV. La influencia de la anisotropía se traduce en la necesidad de elegir de modo diferente los parámetros de la capa equivalente en la construcción de las curvas de SEV de tres capas, según el tipo de las mismas.

En las curvas de SEV de tres capas se puede ver que la rama izquierda de las mismas viene influida por las resistividades ρ_1 y ρ_2 de las dos capas superiores, coincidiendo tanto más dicha rama con la curva de SEV de dos capas de parámetro $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ cuanto menor es la separación de los electrodos de corriente AB.

Igualmente se puede afirmar que, para grandes separaciones de AB, la rama derecha de la curva de SEV de tres capas tenderá a coincidir con una curva de dos capas con un parámetro determinado μ_e que es igual a ρ_3 / ρ_e , siendo ρ_3 la resistividad de la tercera capa del corte dado de tres capas y ρ_e la resistividad de la capa equivalente a las dos superiores.

El problema fundamental, para la construcción gráfica de las curvas de SEV, es el cálculo de los parámetros de esta capa equivalente. Se han establecido para tal cálculo reglas empíricas, a través del estudio de las curvas de SEV calculadas teóricamente.

Estas reglas son distintas para cada uno de los cuatro casos posibles de combinaciones de resistividades en el corte de tres capas.

Veamos separadamente cada uno de los casos:

Primer caso, $\rho_1 > \rho_2, \rho_2 < \rho_3$.

Si para esta relación entre las resistividades, el medio inferior posee naturaleza aislante, es decir, $\rho_3 = \infty$, la distribución del campo eléctrico no se perturba, como demostró Hummel, al sustituir las dos capas superiores del corte por otra de espesor la suma $(h_1 + h_2)$ de los espesores de ambas y resistividad, su resistividad media longitudinal $[\rho_l = (h_1 + h_2)/(S_1 + S_2)]$.

Es decir, que la capa equivalente se define mediante los parámetros indicados. Es fácil entonces calcular las coordenadas del punto de intersección de las rectas definidas por las ecuaciones

$$x = h_1 + h_2, \quad x/y = S_1 + S_2 = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2$$

de las que la primera es una paralela al eje de ordenadas ($AB/2 = 1$) y la segunda sabemos que forma un ángulo de 45° con el eje de abscisas ($\bar{\rho} = 1$) y corta en él un segmento igual a $S_1 + S_2$.

El punto de intersección de las rectas anteriores se llama punto de Hummel y se designa con la letra H . Expresando sus coordenadas por x_H e y_H , tendremos:

$$x_H = h_1 + h_2 \quad (17)$$

$$y_H = \rho_l = (h_1 + h_2)/(S_1 + S_2) \quad (18)$$

El análisis de las curvas calculadas de SEV de tres capas demuestra que, para el caso $\rho_1 > \rho_2, \rho_2 < \rho_3$, las coordenadas del punto H son los parámetros de la capa equivalente no sólo para $\rho_3 = \infty$, sino también, con aproximación suficiente a efectos prácticos, para cualquier $\rho_3 > \rho_2$. De ello se deduce un método sencillo para el trazado de la curva de SEV de tres capas, dados los parámetros del corte, h_1, ρ_1, h_2, ρ_2 y ρ_3 .

En el impreso de SEV se anota el punto de coordenadas h_1, ρ_1 . Este punto se hace coincidir con el origen de coordenadas del ábaco de dos capas (los ejes del impreso y del ábaco citado deberán ser paralelos), calcándose entonces en el impreso la curva correspondiente a $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. Esta curva será la rama izquierda de la curva buscada del corte de tres capas.

Mediante el uso de las fórmulas anteriores o del método gráfico citado, se calculan las coordenadas del punto $H(x_H, y_H)$ que dan el espesor y la resistividad de la capa equivalente. De este modo, el corte de tres capas queda reducido a uno de dos. Superponiendo el punto H , marcado en el impreso correspondiente, con el origen de coordenadas del ábaco de curvas de dos capas, se calca la curva correspondiente al valor $\mu = \rho_3 / \gamma_H$. Esta curva de dos capas será la rama derecha de la curva de tres capas buscada. Tan sólo queda entonces enlazar suavemente las ramas derecha e izquierda ya trazadas, quedando con ello completada la construcción gráfica.

Para enlazar del modo más exacto posible la parte en que se unen ambas ramas de la curva, normalmente se hace uso de las colecciones ya calculadas de curvas de SEV de tres capas. Se elige el ábaco con valores $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ y ρ_3 más próximas a los parámetros del corte en cuestión. Haciendo coincidir el punto h_1, ρ_1 del gráfico con el origen de coordenadas del ábaco elegido, se define del modo más exacto posible la parte intermedia de la curva, interpolando debidamente para el valor dado de la relación $\nu_1 = h_2 / h_1$.

Así pues, mediante la utilización repetida del ábaco de dos capas y el auxilio de la colección de curvas de tres capas se pueden obtener curvas de SEV correspondientes a este tipo de corte de tres capas.

A causa de la utilización del punto H como base para la construcción de curvas de SEV para el caso $\rho_1 > \rho_2, \rho_2 < \rho_3$, se han denominado este corte eléctrico y las curvas correspondientes también como de tipo H .

Para facilitar la determinación del punto H , se ha construido un ábaco especial con ayuda de las fórmulas (17) y (18), a escala bilogarítmica, que permite fijar el mismo para todas las curvas de SEV.

Este ábaco, llamado ábaco auxiliar H , se ha formado para una serie numerosa de valores de $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$, menores que la unidad, y diferentes $\nu_1 = h_2 / h_1$ (fig. 55). En el eje de abscisas se llevan los valores de la relación $x_H / h_1 = (h_1 + h_2) / h_1 = 1 + \nu_1$, y en el eje de ordenadas $y_H / \rho_1 = \rho_2 / \rho_1 = (1 + \nu_1) / (1 + \nu_1 / \mu_1)$. Las curvas del ábaco representan los lugares geométricos de los puntos H para valores dados de μ_1 y ν_1 .

El uso del ábaco H es muy sencillo. Se marca sobre el impreso de SEV el punto de coordenadas h_1, ρ_1 sobre el que se hace coincidir el origen de coordenadas del ábaco. El punto H buscado será aquel al que corresponden los valores μ_1 y ν_1 del corte dado.

Segundo caso, $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

La comparación de las curvas de SEV obtenidas gráficamente con las calculadas, hace ver que, en este caso, la mayor aproximación a la curva teórica de SEV se tiene cuando los parámetros de la capa equivalente a las dos superiores están fijados en función de S y T .

Los parámetros de la capa equivalente vienen dados por las coordenadas del punto de intersección de las dos rectas,

$$x = S_1 + S_2, \quad y = T_1 + T_2$$

siendo

$$S_1 = h_1 / \rho_1; \quad S_2 = h_2 / \rho_2; \quad T_1 = h_1 \cdot \rho_1; \quad T_2 = h_2 \cdot \rho_2$$

Designando las indicadas coordenadas por x_A , y_A , obtenemos

$$x_A = \sqrt{(S_1 + S_2) \cdot (T_1 + T_2)} \quad (19)$$

$$y_A = \sqrt{(T_1 + T_2) / (S_1 + S_2)} \quad (20)$$

El punto A, determinado por estas coordenadas, se denomina punto de anisotropía. Es fácil demostrar que el espesor x_A de

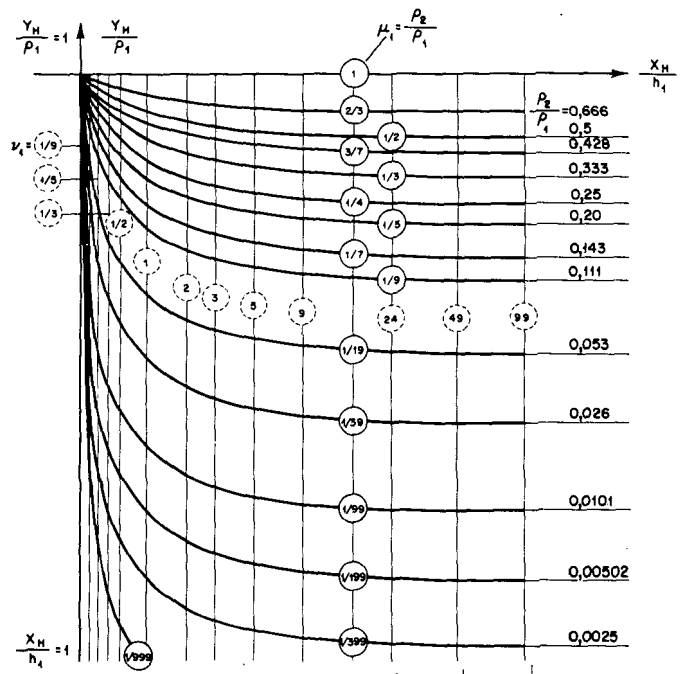


Fig. 55.—Abaco H.

la capa equivalente a las dos superiores es igual a la suma de los espesores de ambas multiplicado por λ , es decir,

$$x_A = \lambda \cdot (h_1 + h_2)$$

siendo λ el coeficiente de anisotropía de estas capas.

Esto se deduce de la expresión conocida del coeficiente de anisotropía, λ :

$$\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_l} = \frac{1}{h_1 + h_2} \cdot \sqrt{(S_1 + S_2)(T_1 + T_2)}$$

Es fácil comprobar también que la resistividad y_A de la capa equivalente es igual a la resistividad media cuadrática ρ_m del conjunto de la primera y segunda capas.

En efecto,

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t} = \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2} \cdot \frac{T_1 + T_2}{h_1 + h_2}} = \sqrt{\frac{T_1 + T_2}{S_1 + S_2}} = y_A$$

Es decir, que el espesor de la capa equivalente que sustituye a la primera y segunda capas en el corte de tres capas, para $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$, no es igual a la suma de sus espesores, como era el caso en el corte de tipo *H*, sino a esta suma multiplicada por λ . La resistividad de esta capa equivalente es igual a ρ_m , es decir, es la resistividad media longitudinal ρ_l del conjunto de la primera y segunda capas del corte multiplicada por λ .

La construcción de curvas de SEV de tipo A, dados los parámetros del corte, se realiza del mismo modo que en el caso de las curvas de tipo *H*. Tan sólo, en lugar del punto *H*, hay que fijar la posición del punto A, mediante las fórmulas (19) y (20) o gráficamente como punto de intersección de dos rectas, una que forma con el eje de abscisas un ángulo de 45° y corte en él un segmento igual a $S_1 + S_2$ y otra que forma un ángulo de 135° y corta un segmento igual a $T_1 + T_2$.

Para hallar la posición del punto A se ha confeccionado el ábaco auxiliar A (fig. 56). Este se ha obtenido mediante las fórmulas (19) y (20), para una serie de valores de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, mayores que la unidad y $\nu_1 = h_2/h_1$. En el eje de abscisas se toma el valor $x_A/h_1 = \sqrt{(1 + \nu_1/\mu_1)(1 + \nu_1 \cdot \mu_1)}$ y en el de ordenadas el valor $y_A/\rho_1 = \sqrt{(1 + \nu_1 \cdot \mu_1)/(1 + \nu_1/\mu_1)}$. Cada una de las curvas dibujadas representa el lugar geométrico de los puntos A para los que es constante μ_1 y variable ν_1 , o recíprocamente variable μ_1 y constante ν_1 .

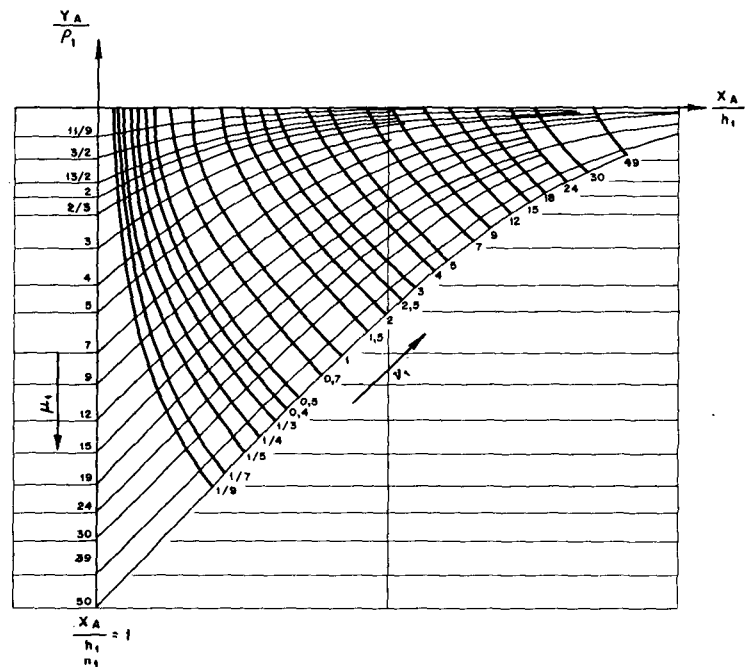


Fig. 56.—Abaco A.

La posición de un punto A determinado del ábaco se obtiene del mismo modo que en el caso del punto H en el ábaco del mismo nombre.

El ábaco A presenta algunas diferencias respecto del ábaco H. Para comodidad de uso, cada curva $\mu_1 = \text{constante}$ del ábaco A tiene su origen de coordenadas. Este se obtiene desplazando en cada caso el origen de coordenadas del ábaco

por debajo del eje de abscisas una cantidad igual a μ_1 . No obstante, con tal construcción del ábaco, el mismo sólo puede utilizarse, si se conoce μ_1 . Surge en la práctica, por consiguiente, la necesidad de adaptar dicho ábaco al caso de conocerse sólo el valor de ν_1 . Para estos casos, el ingeniero D. P. Fedorov modificó el ábaco A en el A ν_1 (fig. 57). En él se tiene un origen de coordenadas para cada curva $\nu_1 = \text{cte}$.

Tercer caso, $\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3$.

El análisis de las curvas teóricas de SEV demuestra que para la construcción gráfica de las mismas es necesario tomar un espesor de la capa equivalente a las dos primeras mayor que en el caso del corte de tipo A. Si en este último caso el

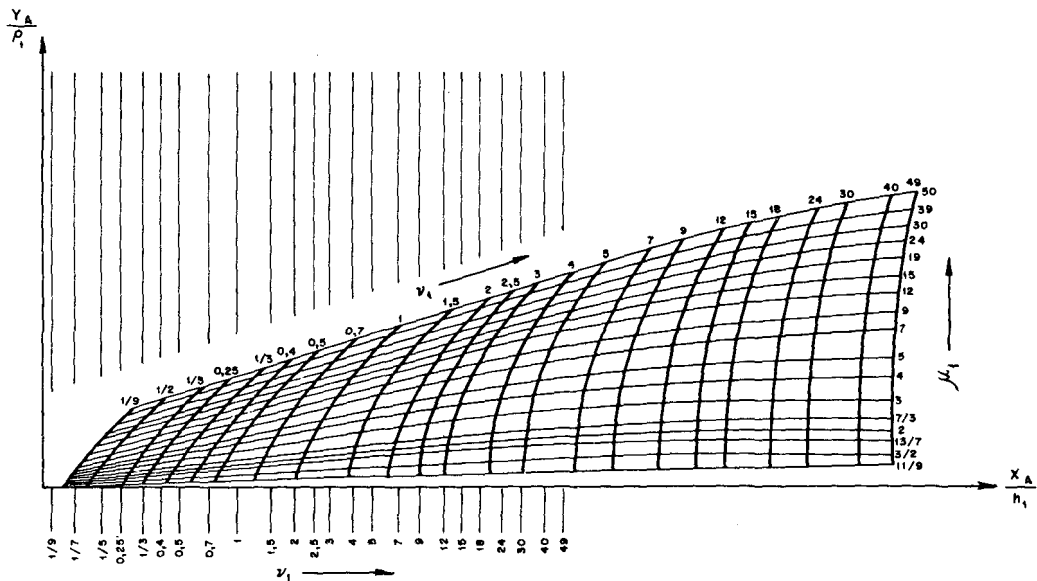


Fig. 57.—
Abaco A_{ν_1} .

espesor de la capa equivalente es $\lambda (h_1 + h_2)$, entonces el espesor de la capa equivalente, para el caso $\rho_1 < \rho_2, \rho_2 > \rho_3$, será $\xi \lambda (h_1 + h_2)$, siendo ξ un factor dado mayor que la unidad y relacionado con este coeficiente de anisotropía λ . En la figura 58 está representada gráficamente la relación, establecida empíricamente, entre λ y ξ . En cuanto a la resistividad de la capa equivalente, para el caso considerado, puede tomarse igual a ρ_m , como en el caso del corte de tipo A.

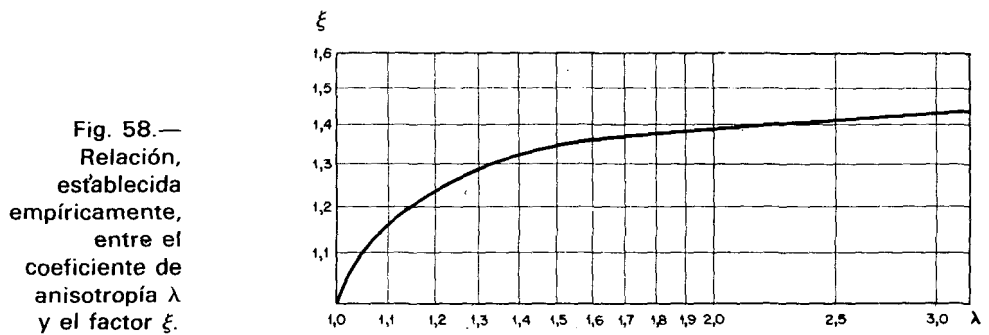


Fig. 58.—
Relación,
establecida
empíricamente,
entre el
coeficiente de
anisotropía λ
y el factor ξ .

Así, pues, los parámetros de la capa equivalente al total de la primera y segunda capas del corte en que $\rho_1 < \rho_2, \rho_2 > \rho_3$, se calculan por las coordenadas de un cierto punto K:

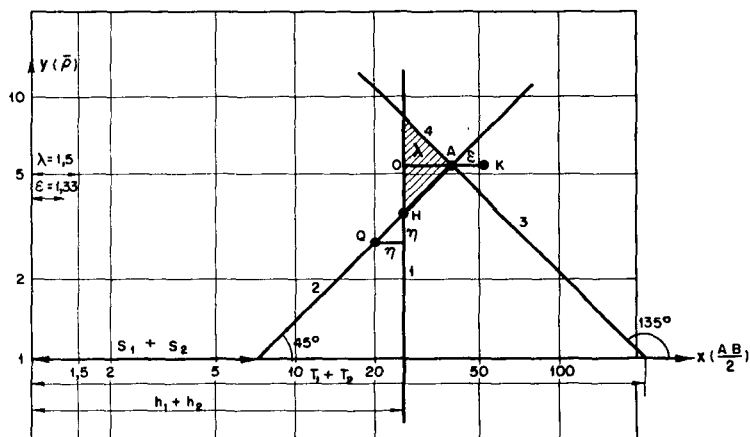
$$x_K = \xi \sqrt{(S_1 + S_2) \cdot (T_1 + T_2)} \quad (21)$$

$$y_K = \sqrt{(T_1 + T_2) / (S_1 + S_2)} \quad (22)$$

El punto K, que resulta de desplazar a la derecha una cantidad ξ el punto A, se denomina punto de anisotropía desplazado.

Para hallar la posición del punto K gráficamente, por consiguiente, se fija la del punto A, desplazando ésta a la derecha, manteniendo la misma ordenada, una distancia igual a ξ . Para determinar ξ es necesario conocer λ . Se aprecia claramente la utilidad, para el cálculo gráfico, del triángulo de anisotropía (fig. 59). Uno de los vértices de este triángulo es el punto A y el vértice que está debajo del punto H. La altura OA del triángulo, es fácil comprobar que es igual al coeficiente de anisotropía λ . Midiendo en el gráfico, en escala logarítmica, este coeficiente y llevando el valor obtenido al gráfico de la figura 58, se obtiene el valor de ξ . Queda entonces, tan sólo, desplazar el punto A a la derecha una cantidad igual a ξ , también en escala logarítmica, para dejar determinada la posición del punto K.

Fig. 59.—Puntos H, A, K y Q obtenidos gráficamente. Triángulo de anisotropía.
 1.—Recta $x = h_1 + h_2$;
 2.—Recta $x/y = S_1 + S_2 = S$;
 3.— $x/y = T_1 + T_2 = T$;
 4.—Triángulo de anisotropía;
 η = Coeficiente de desplazamiento del punto H.



En la práctica, es fácil hallar la posición del punto K con ayuda del ábaco auxiliar K (fig. 60). Este se ha construido mediante las fórmulas (21) y (22) para una amplia gama de valores de $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ y $\nu_1 = h_2 / h_1$, llevando en el eje de abscisas los valores $x_K / h_1 = \sqrt{(1 + \frac{\nu_1}{\mu_1}) \cdot (1 + \nu_1 \cdot \mu_1)}$ y en el de ordenadas los valores $y_K / \rho_1 = \sqrt{(1 + \nu_1 \cdot \mu_1) / (1 + \frac{\nu_1}{\mu_1})}$.

Como se ha dicho en casos anteriores, cada curva del ábaco auxiliar es el lugar geométrico de los puntos K para valores dados de μ_1 y ν_1 .

El ábaco K está construido con el mismo principio que el A, es decir, cada curva $\mu_1 = \text{cte.}$ tiene su origen de coordenadas, lo que hace la utilización práctica del ábaco más cómoda.

Para el caso de que en el corte eléctrico dado sólo se conozca el valor de ν_1 , se ha modificado el ábaco K (del mismo modo

que se ha hecho para el caso del ábaco A) en la forma que se ve en la figura 61. En él también se ha introducido un origen de coordenadas, para cada curva $\nu_1 = \text{cte}$.

No nos detendremos sobre el trazado de las curvas prácticas de tipo K. En principio no difiere del trazado de las curvas de SEV de los tipos H y A.

A. M. Pylaev, como consecuencia del análisis de las curvas de SEV de tipo K propuso introducir, para la construcción de las mismas, un punto K cuya situación se determina de modo distinto. Este punto lo obtiene (fig. 59) desplazando el punto H hacia arriba en la recta $x/y = S_1 + S_2$ una cierta distancia cuya magnitud depende de los valores $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, $\nu_1 = h_2/h_1$ del corte dado. Analizando las curvas de SEV para el corte de tres capas de tipo K, trazadas con ayuda de este punto y comparándolas con las gráficas calculadas, no es posible dejar de llegar a la conclusión de que la construcción que recomienda A. M. Pylaev da una rama derecha de la curva que coincide menos satisfactoriamente con la de la curva teórica que la obtenida utilizando el punto K dado anteriormente.

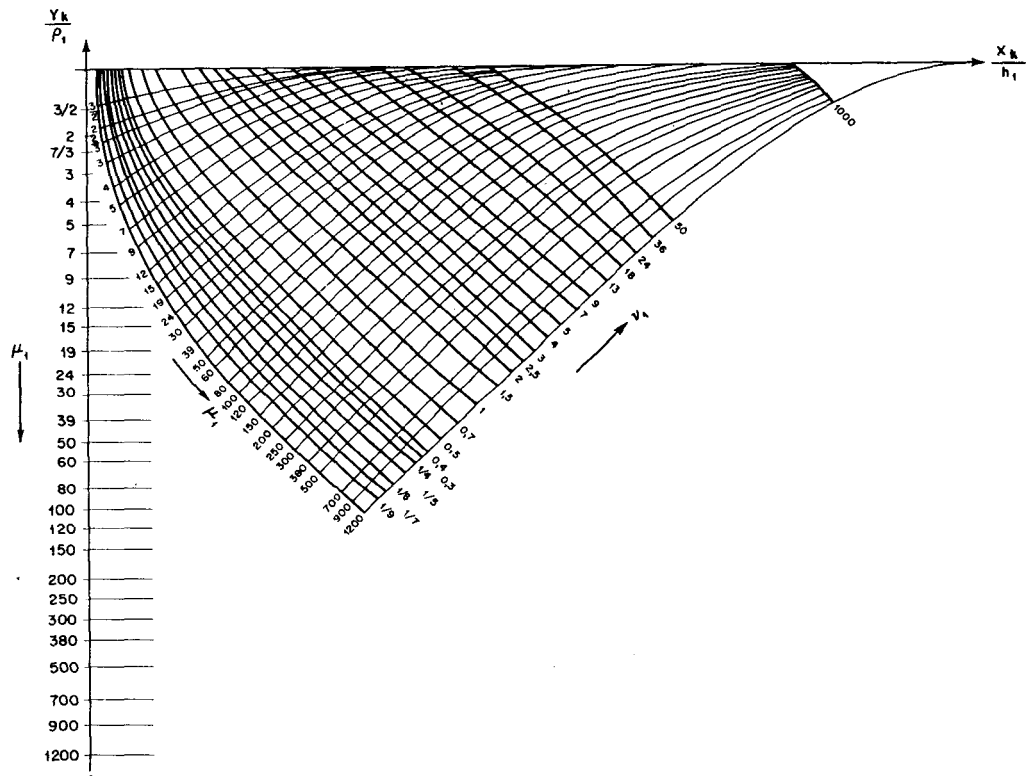


Fig. 60.—Abaco K.

En la figura 62 y a título de ejemplo se compara la posición de la rama derecha de una curva con auxilio de ambos puntos K, para diferentes combinaciones de los parámetros del corte. Esta comparación no permite recomendar la construcción de las curvas con ayuda del punto K propuesto por A. M. Pylaev.

Cuarto caso, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

Se ha comprobado empíricamente que, para la construcción gráfica de las curvas de SEV, en este caso el espesor de capa

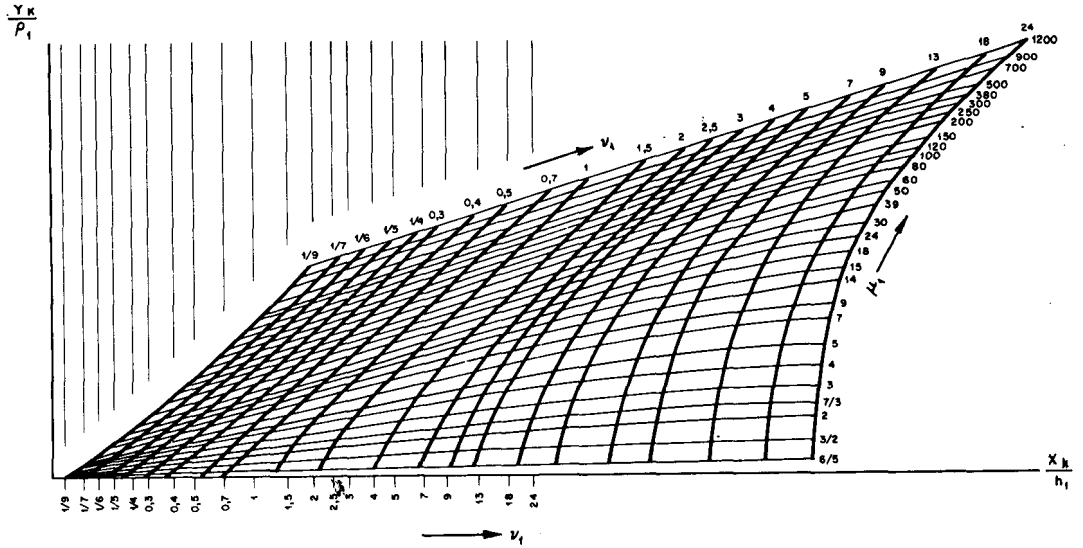
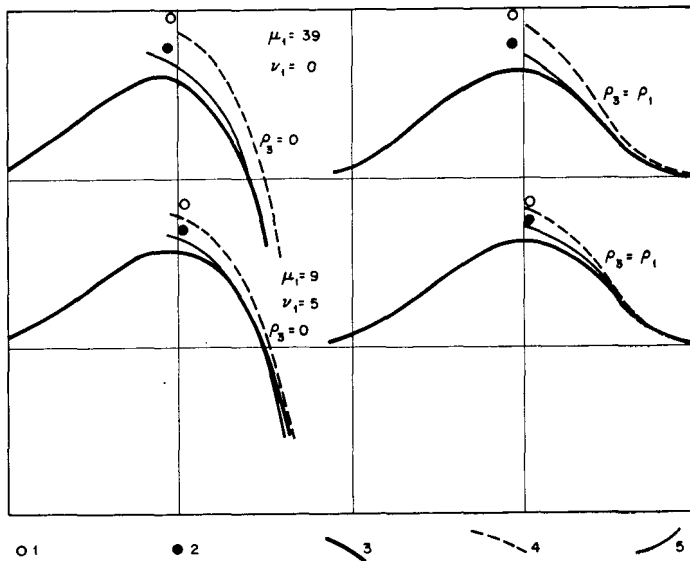


Fig. 61.—
Abaco K₁.

- Fig. 62.—Error en la construcción de la rama derecha de la curva de SEV, al tomar el punto K de A. M. Pylaev.
- 1.—Punto K de A. M. Pylaev.
 - 2.—Punto K del ábaco K (interpretación habitual).
 - 3.—Curva teórica de SEV.
 - 4.—Rama derecha de la curva de SEV, obtenida mediante el punto K de A. M. Pylaev.
 - 5.—Rama derecha de la curva de SEV, obtenida mediante el punto K (interpretación habitual).



equivalente a las dos capas superiores es menor que la suma de los espesores de ambas ($h_1 + h_2$) en un factor $1/\eta$ que depende de los parámetros μ_1 y ν_1 del corte. En cuanto a la resistividad de esta capa equivalente también es menor que la resistividad media longitudinal de las dos capas a que sustituye, en el mismo factor.

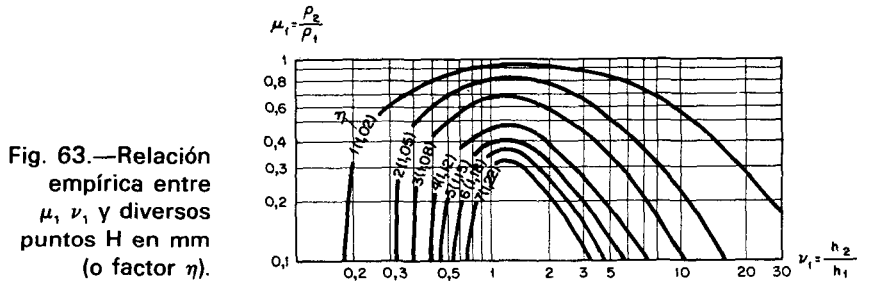
Por tanto, expresando el espesor y la resistividad de la capa equivalente por las coordenadas de un cierto punto Q, tendremos:

$$x_0 = (h_1 + h_2) / \eta \quad (23)$$

$$y_0 = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2} \quad (24)$$

Se puede ver que estas expresiones representan las coordenadas del punto H divididas por η . De ello se deduce un método gráfico simple de cálculo de la posición del punto Q en el impreso de SEV. Obtenido el punto H, se desplaza el mismo a lo largo de la recta S (fig. 59), trasladándose en dirección al origen un segmento igual a η en los ejes coordenados. Este punto H desplazado nos da el punto Q.

Para el cálculo del coeficiente η en función de μ_1 y ν_1 se utiliza un diagrama obtenido empíricamente (fig. 63). En él se indican las distancias, en mm (para escala logarítmica de módulo 62,5 mm) que hay que desplazar el punto H a lo largo

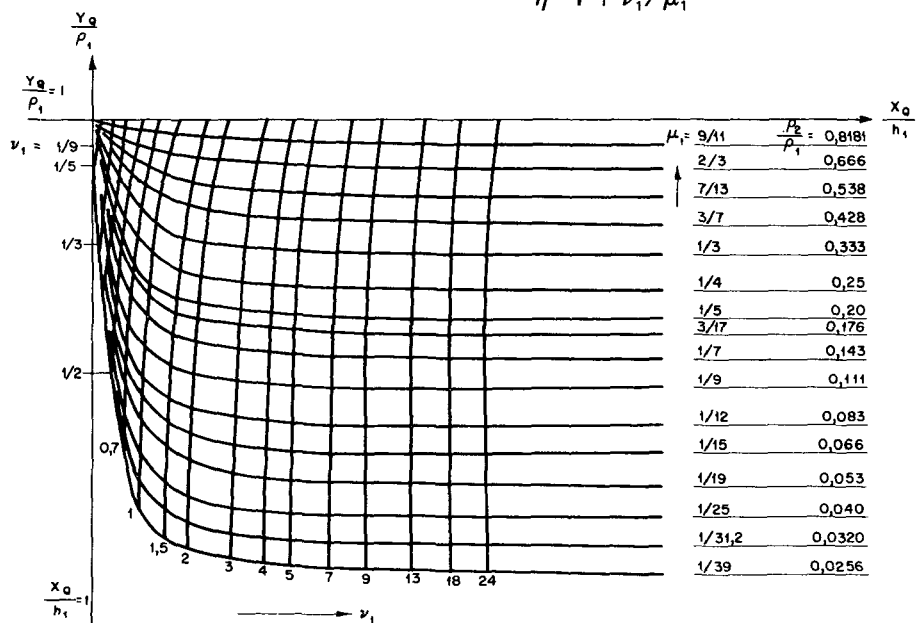


de la recta S para obtener el punto Q. Entre paréntesis se indican los valores del coeficiente η .

Las curvas de SEV correspondientes al corte para el que $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, se denominan curvas de tipo Q.

Del mismo modo que en todos los casos anteriores, para la construcción de estas curvas de SEV de tres capas se ha confeccionado un ábaco auxiliar Q para la más fácil determinación de la posición del correspondiente punto Q. Comprende curvas que son el lugar geométrico de los puntos Q_n para μ_1 constante (fig. 64). En el eje de abscisas se toman los valores $x_Q/h_1 = (1 + \nu_1)/\eta$ y en el eje de ordenadas los valores

$$y_Q/\rho_1 = \frac{1}{\eta} \frac{1 + \nu_1}{1 + \nu_1/\mu_1}$$



Tales son los principios y métodos gráficos de obtención de las curvas de SEV de tres capas.

Es necesario señalar que el error en la construcción de las curvas de SEV puede llegar a $\pm 10\%$ y, en casos aislados, aún más, como lo pone de manifiesto la comparación de las curvas de SEV teóricas con las construidas gráficamente.

Además del método expuesto para la construcción gráfica de las curvas de SEV de tres capas, existe para su estudio el método de A. I. Bogdanov. Partiendo de las colecciones de ábacos existentes, este autor construyó unos nomogramas que relacionan entre sí los valores $\log(\bar{\rho}/\rho_1)$ con $\log(h_2/h_1)$, $\log(\rho_2/\rho_1)$, y $\log(\rho_3/\rho_1)$ para los cuatro valores $AB/2h_1$ 4, 8, 16 y 32. Estos nomogramas dan por consiguiente la posibilidad de obtener curvas de SEV de tres capas, para diversos parámetros del corte, definidas por los cuatro puntos en que se conoce $\bar{\rho}/\rho_1$ y la posición de las asíntotas de las ramas inicial y final de la curva.

Los nomogramas, para mayor comodidad en la interpolación, se han construido con escalas aritméticas, pero en lugar de la relación de parámetros se debe tomar en todos ellos los logaritmos de estas relaciones. En el eje de abscisas se lleva $\log(\rho_2/\rho_1)$ y en el de ordenadas $\log(h_2/h_1)$. En cada nomograma es constante $\log(\rho_3/\rho_1)$. Cada nomograma comprende cuatro familias de curvas con el mismo valor de $\log(\rho_3/\rho_1) = 0,5$ ($\rho_3/\rho_1 = 3,16$).

En la fig. 65 se tiene un ejemplo de tales nomogramas, para $\log(\rho_3/\rho_1) = 0,5$ ($\rho_3/\rho_1 = 3,16$).

Los nomogramas de A. I. Bogdanov se han construido para 19 valores de $\log(\rho_3/\rho_1)$ desde $-\infty$ a $+\infty$ (que corresponden a variaciones de ρ_3/ρ_1 entre 0 e ∞) que varían en 0,25 unidades logarítmicas (tabla 8). Los valores de los logaritmos de las restantes relaciones de parámetros y de $\log(\bar{\rho}/\rho_1)$ varían en 0,1 unidades logarítmicas.

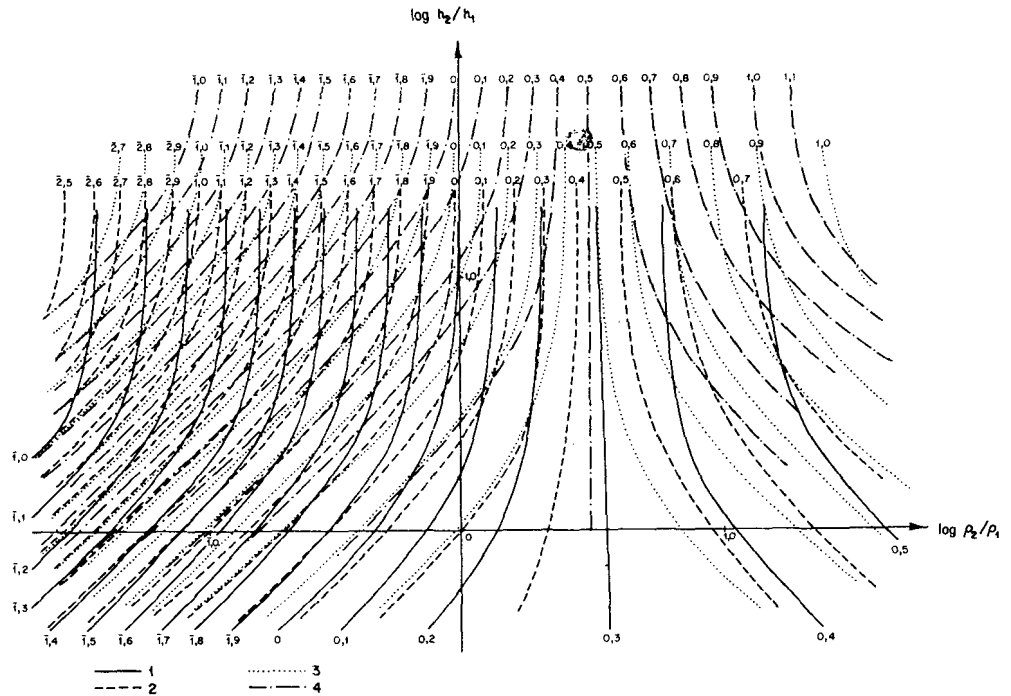
TABLA 8

VALORES DE ρ_3/ρ_1 PARA LOS QUE SE HAN CONSTRUIDO LOS NOMOGRAMAS DE A. I. BOGDANOV

N.º del nomograma	$\log(\rho_3/\rho_1)$	ρ_3/ρ_1	N.º del nomograma	$\log(\rho_3/\rho_1)$	ρ_3/ρ_1
1	-	0,00	11	0,25	1,78
2	̄2,00	0,01	12	0,50	3,16
3	̄2,25	0,02	13	0,75	5,62
4	̄2,50	0,03	14	1,00	10,00
5	̄2,75	0,06	15	1,25	17,80
6	̄̄1,00	0,10	16	1,50	31,60
7	̄̄1,25	0,18	17	1,75	56,20
8	̄̄1,50	0,32	18	2,00	100,00
9	̄̄1,75	0,56	19	∞	∞
10	0,00	1,00			

Para la construcción práctica de las curvas de SEV se llevan al nomograma correspondiente al $\log(\rho_3/\rho_1)$ dado, los valores de los logaritmos de las relaciones de los parámetros ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 , leyéndose los valores de $\log(\bar{\rho}/\rho_1)$ para las cuatro separaciones de electrodos indicadas por $AB/2h_1$; se puede construir la correspondiente curva de SEV con estos cuatro puntos y conociendo la situación de las dos asíntotas. La

Fig. 65.—
Nomograma de
A. I. Bogdanov
para la
construcción e
interpretación
gráfica de las
curvas de SEV
de tres capas para
 $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 3,16$.
Líneas de igual
valor de $\log \bar{\rho}/\rho_1$;
1.—Para
 $AB/2 h_1 = 4$;
2.—Para
 $AB/2 h_1 = 8$;
3.—Para
 $AB/2 h_1 = 16$;
4.—Para
 $AB/2 h_1 = 32$.



parte izquierda de la curva se puede determinar con ayuda del ábaco de dos capas. En la utilización de los nomogramas hay que recurrir ampliamente a la interpolación.

Este método no ha obtenido gran difusión en la práctica. Ello se explica porque a veces son insuficientes los cuatro puntos dados por el ábaco para la construcción de la curva de SEV. No obstante, al dar la posibilidad de estudiar la marcha de la curva de SEV de tres capas para una amplia gama de valores de ρ_3/ρ_1 , este método de construcción gráfica tiene gran interés tanto desde el punto de vista teórico como práctico y volveremos a hablar de él al estudiar la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV.

15. Principio de equivalencia

El estudio de las curvas de SEV de tres capas pone de manifiesto que, para determinados casos de relación de los parámetros del corte, un cambio en la resistividad y espesor de la capa intermedia no provoca variaciones notables en el aspecto de la curva de SEV. Por ello, al interpretar los resultados de la exploración eléctrica, no es siempre factible dar exactamente las características de la capa intermedia de dicha curva de SEV. Ello puede conducir a errores de consideración al fijar la profundidad del substrato resistente.

Del estudio de las curvas calculadas de SEV y según la teoría de su cálculo, se deduce que las curvas de SEV de tres capas que reflejan un corte cuya capa intermedia tiene

relativamente poco espesor, no cambia prácticamente de forma, para ρ_3/ρ_1 constante, si h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 varían simultáneamente según condiciones dadas, que dependen del tipo del corte eléctrico.

Así, en el corte de tipo H ($\rho_1 > \rho_2$, $\rho_2 < \rho_3$) o A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) la curva de SEV no varía apenas de aspecto siempre que se multipliquen o dividan por un mismo número, los parámetros h_2 y ρ_2 de la segunda capa. Dicho de otra forma, los cortes eléctricos de tipo H o A, y dentro de ciertos límites, son prácticamente equivalentes entre sí a efectos de la distribución superficial del potencial, siempre que al variar h_2 y ρ_2 , la relación $h_2/\rho_2 = S_2$ se mantenga constante (fig. 66).

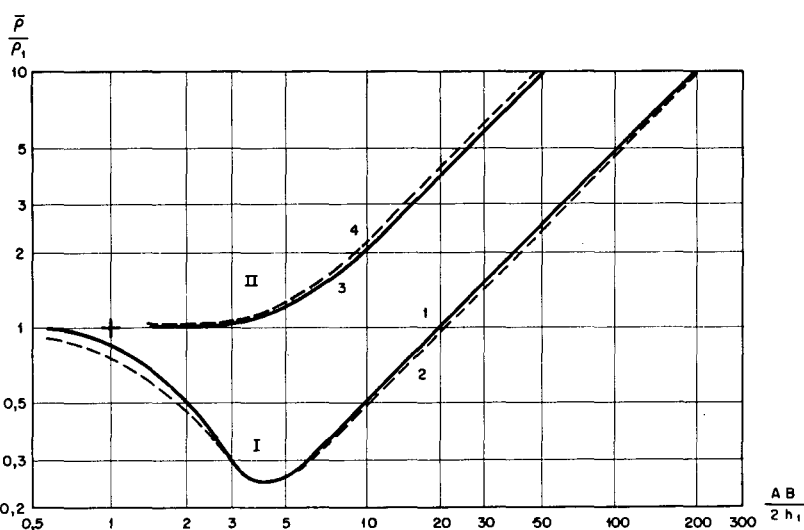


Fig. 66.—Curvas de SEV equivalentes, de los tipos H y A.

I - Curvas de SEV del tipo H. $\rho_3 = \infty$; 1 - $\frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{19}$, $\frac{S_2}{S_1} = 19$; 2 - $\frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{9}$, $\frac{S_2}{S_1} = 18$;
 II - Curvas de SEV del tipo A. $\rho_3 = \infty$ 3 - $\frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 39$, $\frac{S_2}{S_1} = 18,5$; 4 - $\frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 19$, $\frac{S_2}{S_1} = 19$

En el caso del corte de tres capas de tipo K ($\rho_1 < \rho_2$; $\rho_2 > \rho_3$) o tipo Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) la curva de SEV no varía prácticamente de aspecto si al multiplicar o dividir el espesor h_2 por un cierto número, se divide o multiplica simultáneamente la resistividad ρ_2 por ese mismo número. Es decir, en los cortes de tipo K y Q se pueden variar hasta ciertos límites los valores de los parámetros h_2 y ρ_2 , siempre que se mantenga constante el producto $h_2 \cdot \rho_2 = T_2$, sin que la distribución superficial del potencial varíe, siendo, por tanto, los cortes equivalentes a efectos de los SEV realizados (fig. 67).

Esta particularidad del corte eléctrico da origen a interpretaciones múltiples de un mismo SEV, originando lo que se ha llamado el principio de equivalencia. Para diferenciarlos entre sí, se denominan a los cortes de tipo H y A que tienen esta propiedad, equivalentes en S y a los de tipo K y Q, equivalentes en T.

El estudio del tema ha demostrado que para el corte de tipo Q el principio de equivalencia (en T) tiene aplicación sólo de modo aproximado. En la práctica se tienen curvas de SEV de tipo Q iguales, en el caso de h_2/h_1 relativamente pequeño, si

al variar en el corte el valor de ρ_2 , se varía al mismo tiempo h_2 en un orden de magnitud varias veces menor que el de ρ_2 . Si h_2/h_1 es relativamente grande, entonces el espesor h_2 tendrá que variar en un orden de magnitud varias veces mayor que el correspondiente valor de ρ_2 . Estas singularidades

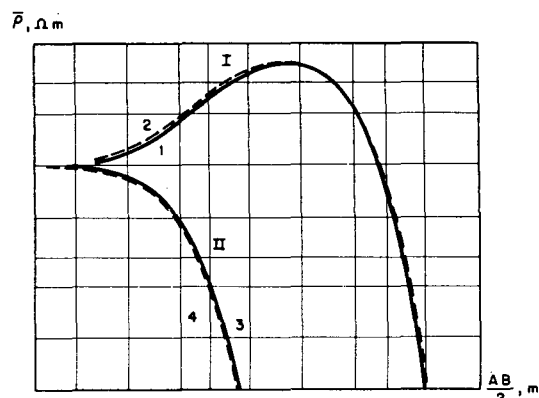


Fig. 67.—Curvas equivalentes en SEV de los tipos K y Q.

- I - Curvas de SEV de tipo K, $\rho_3 = 0$; 1- $\frac{h_2}{h_1} = 2, \frac{\rho_2}{\rho_1} = 19, \frac{T_2}{T_1} = 38$
 2- $\frac{h_2}{h_1} = 1, \frac{\rho_2}{\rho_1} = 39, \frac{T_2}{T_1} = 39$
 II - Curvas de SEV de tipo Q, $\rho_3 = 0$; 3- $\frac{h_2}{h_1} = 2, \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{39}, \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{18,5}$
 4- $\frac{h_2}{h_1} = 1, \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{19}, \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{19}$

del corte de tipo Q se aprecian en el nomograma correspondiente, que se representa más adelante.

El principio de equivalencia tiene aplicación, como se ha demostrado, en los cortes caracterizados por un valor pequeño de la relación $\nu_1 = h_2/h_1$. Este valor puede ser diferente, en función de los parámetros del corte $\mu_1 = \rho_2/\rho_1, \mu_2 = \rho_3/\rho_1$. Para la interpretación de un trabajo es necesario conocer este valor mínimo de h_2/h_1 , a partir del cual tiene aplicación el principio de equivalencia en el corte de tres capas de cada uno de los cuatro tipos. Además de esto, para la interpretación de las curvas de SEV, tiene gran interés práctico la determinación del intervalo de variación posible de h_2 y ρ_2 , para cualquier corte dado de tres capas, dentro de límites de aplicación del principio de equivalencia. De estos problemas se han ocupado bastante A. I. Bogdanov y, sobre todo, A. M. Pylaev.

Para la fijación de los límites de aplicación del principio de equivalencia es necesario, ante todo, convenir sobre la exactitud en la coincidencia de las curvas de SEV. Puesto que los errores de medición admitidos en el trabajo de campo son de un $\pm 5\%$, es lógico tomar como prácticamente coincidentes las curvas cuyas discrepancias no sobrepasen esta cantidad. Hay que advertir que las partes más características de las curvas de SEV en que con mayor claridad se nota la no coincidencia es en los máximos y mínimos.

Si, por ejemplo, comparamos entre sí las curvas calculadas de SEV de tipo K, de los cortes en que son constantes $T_2/T_1 = 12$, $\rho_3 = 0$, y variables h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 (fig. 68) tendremos que, dentro del límite de precisión de medida de las curvas de campo, los cortes correspondientes, podemos considerarlos

como equivalentes entre sí para $\rho_2/\rho_1 \geq 9$. En efecto, las curvas de SEV para ρ_2/ρ_1 igual a 9, 19 y 39 coinciden prácticamente entre sí y puede ser tomado como límite de todas ellas el caso en que $\rho_2 \rightarrow \infty$ y $T_2/T_1 = 12$. Por tanto, si $\rho_2/\rho_1 = 9$, entonces empezando por $h_2/h_1 \approx 1,3$, se puede

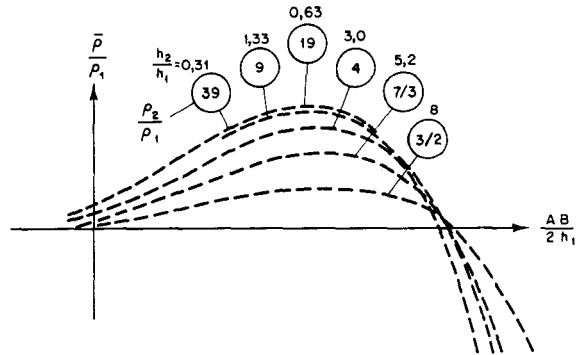


Fig. 68.—Curvas equivalentes en SEV de tipo K ($\rho_3 = 0$) para el caso $T_2/T_1 = 12$.

aumentar de modo ilimitado ρ_2/ρ_1 y disminuir simultáneamente y en la misma proporción h_2/h_1 , sin que prácticamente se originen cambios en la forma de la curva. Si $\rho_2/\rho_1 = 19$, entonces el límite máximo de h_2/h_1 , a partir del cual puede ir disminuyendo ilimitadamente el valor de esta relación y aumentando el de ρ_2/ρ_1 en la misma proporción, es ya de $h_2/h_1 \approx 0,6$ y así sucesivamente.

Definidos, de tal modo con ayuda de los ábacos de curvas calculadas de SEV de tres capas, para valores dados de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , estos límites de h_2/h_1 a partir de los cuales, conservando la equivalencia de los cortes, se puede disminuir hasta valores muy pequeños la resistividad ρ_2 en el corte de tipo H (permaneciendo constante $S_2 = h_2/\rho_2$) o aumentarla hasta límites muy altos en los cortes de tipo K (para constancia de $T_2 = h_2 \rho_2$), es factible confeccionar nomogramas que evidencien de forma clara estos límites. En la figura 69 se tiene este nomograma para el corte de tipo H, y en la figura 70 para el corte de tipo K. En el primer nomograma, en el que están marcadas las líneas de igual valor de S_2 , es fácil encontrar, dados ρ_2/ρ_1 , $\rho_3 = \rho_1$ o $\rho_3 = \infty$, el valor máximo de h_2/h_1 a partir del cual pueden disminuirse h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 de modo ilimitado en la misma proporción, sin que ello afecte en la práctica a la forma de la curva de SEV. Este valor de h_2/h_1 ,

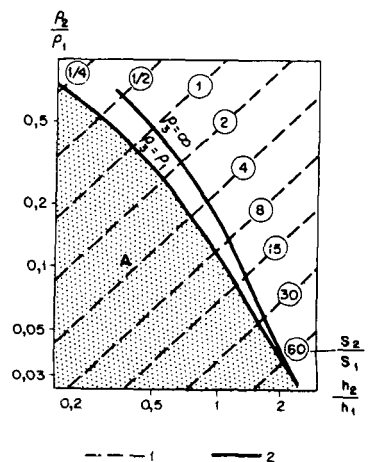


Fig. 69.—Difusión del principio de equivalencia en el corte de tres capas de tipo H (por A. M. Pylaev).
1.—Líneas de igual valor de S_2/S_1 ;
2.—Líneas que limitan el área de aplicación

del principio de equivalencia en S, en el corte de tres capas de tipo H, para $\rho_3 = \infty$ y $\rho_3 = \rho_1$.
A.—Zona de aplicación del principio de equivalencia, para $\rho_3 = \rho_1$.

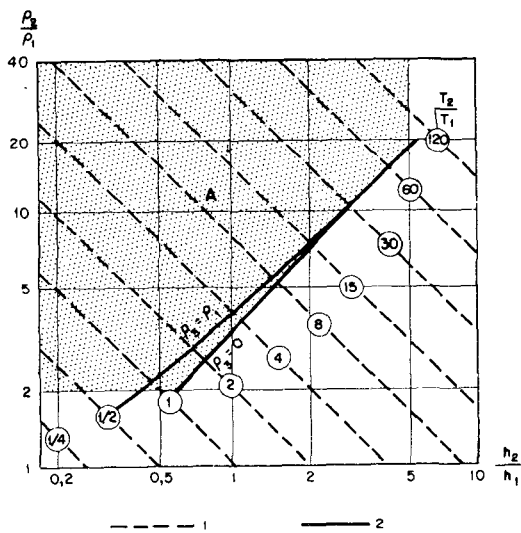
queda fijado por las curvas correspondientes a $\rho_3 = \rho_1$, $\rho_3 = \infty$ en el nomograma. Dichas curvas son el lugar geométrico de los puntos con abcisa y ordenada iguales a estos valores máximos de los parámetros del corte de tres capas de tipo H (para un valor de ρ_3/ρ_1 dado) a partir de los cuales la curva de SEV, en caso de variación del corte, difiere de la curva límite de SEV, para $\rho_2/\rho_1 \rightarrow 0$ y $h_2/h_1 \rightarrow 0$, en valores de $\bar{\rho}$ que no sobrepasen $\pm 5\%$.

La posición de las curvas para $\rho_3 = \rho_1$ y $\rho_3 = \infty$ en el nomograma evidencia que al disminuir ρ_3 los límites de aplicación del principio de equivalencia se reducen.

Del mismo modo ocurre en el segundo nomograma, en el que hay trazadas líneas del mismo valor de T_2 y en el que, dados ρ_2/ρ_1 , $\rho_3 = \rho_1$ o $\rho_3 \rightarrow 0$, se deduce el valor máximo de h_2/h_1 a partir del cual se puede aumentar de forma ilimitada ρ_2/ρ_1 y disminuir al mismo tiempo y en la misma proporción h_2/h_1 , sin que ello provoque un cambio apreciable en la forma de la curva de SEV de tipo K. Las curvas correspondientes a $\rho_3 = \rho_1$ y $\rho_3 = 0$ son el lugar geométrico de los puntos con abcisa y ordenada tales que a partir de ellos, a igualdad de los parámetros del corte de tres capas de tipo K, en las curvas de SEV el valor de $\bar{\rho}$ se diferencia sólo en $\pm 5\%$ aproximadamente del correspondiente a la curva límite de SEV definida por $\rho_2/\rho_1 \rightarrow \infty$ y $h_2/h_1 \rightarrow 0$.

Fig. 70.—Difusión del principio de equivalencia en el corte de tres capas de tipo K (por A. M. Pylaev).

- 1.—Líneas de igual valor de T_2/T_1 ;
- 2.—Líneas que limitan la zona de aplicación del principio de equivalencia en T , en el corte de tres capas de tipo K, para $\rho_3 = 0$ y $\rho_3 = \rho_1$;
- A.—Zona de aplicación del principio de equivalencia, para $\rho_3 = 0$.



Del nomograma citado se deduce que, al aumentar ρ_3 , los límites de aplicación del principio de equivalencia se reducen.

De la comparación de los dos nomogramas (figs. 69 y 70) podemos sacar la conclusión de que en el caso del corte de tipo K, el principio de equivalencia abarca una zona de aplicación mayor que en el caso del corte de tipo H.

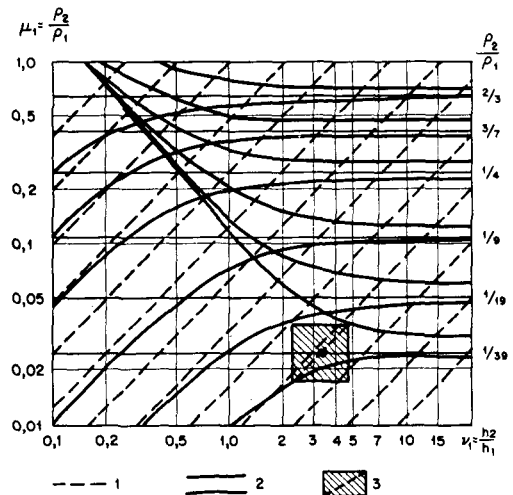
Veamos ahora el problema de la determinación de los límites de aplicación del principio de equivalencia en los cortes de tres capas.

Trataremos independientemente la solución del problema en cada uno de los tipos de corte.

Corte de tipo H (principio de equivalencia en S)

Analizando las curvas calculadas de SEV de este tipo, se puede, con ayuda de varias instrucciones intermedias, confeccionar un diagrama que indique cuánto se puede aumentar o disminuir el espesor y la resistividad de la segunda capa para diversos parámetros iniciales $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$, $\nu_1 = h_2 / h_1$ y $\mu_2 = \rho_3 / \rho_1$, de modo que en las nuevas curvas de SEV no se diferencia el valor de $\bar{\rho}$ mínimo en más de $\pm 5\%$ del correspondiente a la curva inicial de SEV. Un diagrama de este tipo, para $\rho_3 = \rho_1$, está representado en la figura 71.

Fig. 71.—Límites de aplicabilidad del principio de equivalencia en curvas de SEV de tres capas de tipo H, para $\rho_3 = \rho_1$ (por A. M. Pylaev).
 1.—Líneas de igual valor de S_2/S_1 ;
 2.—Límites de variación de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 entre los que se conserva el corte equivalente al corte dado de tipo H, para $\rho_3 = \rho_1$;
 3.—Zona de variación posible de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 para $\mu_1 = 1/39$ y $\nu_1 = 3,4$.



Para cada valor μ_1 del ábaco se han trazado en el diagrama dos curvas (superior e inferior); estas curvas limitan la zona de aplicación del principio de equivalencia para valores dados de μ_1 y ν_1 , es decir, la zona de la variación posible de los parámetros ρ_2 y h_2 que no influye, desde el punto de vista práctico en la marcha de la gráfica de SEV. En la zona comprendida entre estas dos curvas límite, no pueden variar los valores de ρ_2 y h_2 de modo arbitrario, sino que se debe cumplir la condición de que S_2 permanezca constante. Por ejemplo, si para la curva de SEV dada, tenemos $\mu_1 = 1/39 = 0,0256$, $\nu_1 = 3,4$, $\rho_3 = \rho_1$, obtendremos del diagrama que, según el principio de equivalencia, podemos hacer variar μ_1 entre 0,017 y 0,036; simultáneamente ν_1 puede hacerse variar de 2,3 a 4,8. Por consiguiente, en este caso, μ_1 y ν_1 , pueden ser respecto a sus valores iniciales tan sólo de 1,4 a 1,5 veces. Para estas variaciones de los parámetros, las curvas de SEV obtenidas prácticamente no se diferenciarán en su forma de la curva de SEV dada.

Si el valor inicial de μ_1 no corresponde a ninguno de estos valores para los que se ha construido el diagrama, se pueden obtener los límites admisibles de variación de μ_1 y ν_1 mediante interpolación, comparando la zona de aplicación del principio de equivalencia para el valor ν_1 dado, con las correspondientes a los valores contiguos de μ_1 .

Puesto que la zona de aplicación del principio de equivalencia en S crece al aumentar ρ_3 , entonces una vez definida esta zona para el diagrama ($\rho_3 = \rho_1$) podemos asegurar que tendrá aún mayor extensión si $\rho_3 > \rho_1$.

La zona de aplicación del principio de equivalencia en el corte de tipo H, como se aprecia en el diagrama, se reduce de modo considerable al aumentar h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . Esto evidencia la posibilidad de una interpretación única de las curvas de SEV de este tipo para valores de los parámetros de la capa intermedia suficientemente grandes. Y recíprocamente, si h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 son pequeños, la interpretación única de las curvas de SEV de tipo H (fijación de h_2/h_1) no es posible sin un conocimiento del valor del parámetro ρ_2/ρ_1 . Estas conclusiones son también válidas para las curvas de SEV de tipo A.

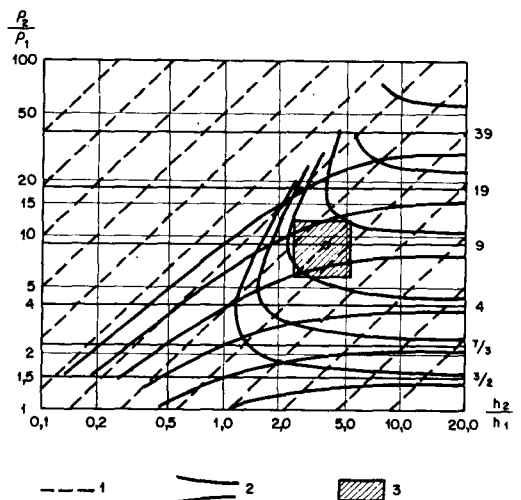
Corte de tipo A (principio de equivalencia en S)

Las investigaciones de las curvas calculadas de SEV llevaron a A. M. Pylaev a construir un diagrama (fig. 72) que, del mismo modo que en el caso anterior, permite hallar los límites de aplicación del principio de equivalencia, para diferentes valores iniciales de μ_1 y ν_1 , en el caso de $\rho_3 = \infty$.

La utilización del diagrama es la misma que en el caso de equivalencia para curvas de SEV de tipo H.

Fig. 72.—Límites de aplicabilidad del principio de equivalencia en curvas del SEV de tres capas de tipo A, para $\rho_3 = \infty$ (por A. M. Pylaev).

- 1.—Líneas de igual valor de S_2/S_1 .
- 2.—Límites de variación de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 entre los que se conserva el corte equivalente al corte dado de tipo A, para $\rho_3 = \infty$.
- 3.—Zona de variación posible de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 para $\mu_1 = 9$ y $\nu_1 = 3,8$.



La comparación de ambos diagramas demuestra que, en el caso del corte de tipo A, la zona de aplicación del principio de equivalencia es mucho mayor que para el corte de tipo H. Si, por ejemplo, se toman para el corte de tipo A como parámetros iniciales $\mu_1 = 39$, $\nu_1 = 3,4$, $\rho_3 = \infty$, se tiene que en el sentido de disminuir ambos parámetros h_2 y ρ_2 simultáneamente pueden variar ilimitadamente.

Si los parámetros iniciales del corte son, por ejemplo, $\mu_1 = 9$ y $\nu_1 = 3,8$, entonces, para $\rho_3 = \infty$, como se ve en el diagrama, pueden aumentarse o disminuirse en la misma proporción entre los límites correspondientes, que van de 5,8 a 12 y de 2,5 a 5,2.

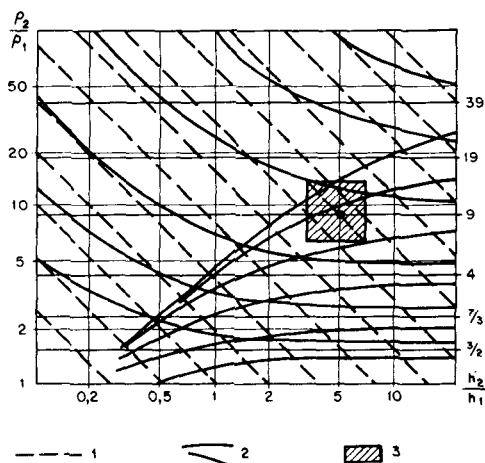
Del diagrama de equivalencia para el corte de tipo A se comprueba también que los límites de aplicación del principio de equivalencia son, para este caso, tanto más amplios cuanto mayor sea ρ_2/ρ_1 , y menor h_2/h_1 .

Corte de tipo K (principio de equivalencia en T)

Como en los dos casos anteriores, el análisis de las curvas calculadas de SEV de tipo K ha permitido construir un diagrama para la fijación de los cambios admisibles en los valores de μ_1 y ν_1 , de forma tal que no tengan influencia práctica en la forma de la curva de SEV. Igualmente se han estimado los límites de aplicación del principio de equivalencia en el caso concreto de cortes de tipo K. El estudio se ha realizado para el caso $\rho_3 = \rho_1$. No es necesario considerar también el caso de $\rho_3 = 0$, ya que la zona de aplicación del principio de equivalencia para el corte de tipo K se hace mayor al disminuir ρ_3 .

En el diagrama (fig. 73) se han trazado, de línea interrumpida, a intervalos dados, líneas de igual valor de T_2/T_1 . Dos curvas

Fig. 73.—Límites de aplicabilidad del principio de equivalencia en T para curvas de SEV de tres capas de tipo K, para $\rho_3 = \rho_1$ (por A. M. Pylaev).
 1.—Líneas de igual valor de T_2/T_1 .
 2.—Límites de variación de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 entre los que se conserva el corte equivalente al corte dado de tipo K, para $\rho_3 = \rho_1$.
 3.—Zona de variación posible de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 para $\mu_1 = 9$ y $\nu_1 = 5$.



límite trazadas para cada uno de los valores μ_1 de los ábacos, limitan la zona de aplicación del principio de equivalencia en el corte, para este valor de μ_1 y diferentes ν_1 . Las curvas hacen ver en cuánto puede aumentar o disminuir la resistividad ρ_2 de la segunda capa y la correspondiente disminución o aumento de su espesor h_2 , para que la curva de SEV se diferencie de la curva de SEV inicial, en cuanto a valores de $\bar{\rho}$, en menos de $\pm 5\%$. Es claro que ρ_2 y h_2 , en la zona comprendida entre las curvas límite, no pueden tomar valores arbitrarios, sino que deben corresponder estos valores a puntos de la línea de igual valor de T_2/T_1 . Por ejemplo, para valores iniciales $\rho_3 = \rho_1$, $\mu_1 = 9$ y $\nu_1 = 5$ ($T_2/T_1 = 45$) el parámetro ρ_2/ρ_1 de la segunda capa puede alcanzar un máximo de 14 o disminuir hasta 6,4, con la correspondiente disminución de h_2/h_1 hasta 3,2, o aumento hasta 7 respectivamente. Estas curvas de SEV, prácticamente, no se diferencian de la curva inicial del sondeo vertical.

Si el valor de μ_1 dado no está en el ábaco, se interpola, del mismo modo que en el caso de los cortes de tipo H y A.

Comparando entre sí los diagramas, se comprueba de nuevo que el principio de equivalencia para el corte de tipo K tiene aplicación entre límites más amplios que en el corte de tipo H.

Al disminuir ρ_2/ρ_1 y aumentar h_2/h_1 , la zona de aplicación del principio de equivalencia para el corte de tipo K se reduce. Esto permite afirmar que se puede obtener una interpretación única de las curvas de tipo K con ayuda de los ábacos, si ρ_2/ρ_1 es suficientemente pequeño y h_2/h_1 suficientemente grande. Por el contrario si el parámetro h_2/h_1 de la capa intermedia es pequeño y el parámetro ρ_2/ρ_1 grande (estando estos valores dentro de los límites de aplicación del principio de equivalencia), para poder tener una interpretación cuantitativa única de la curva de SEV, es necesario conocer uno de estos parámetros.

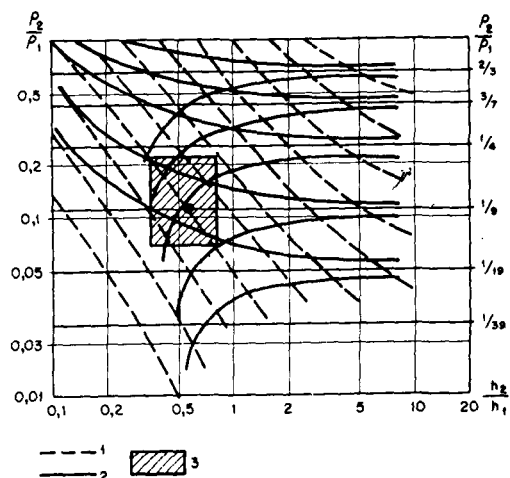
Corte de tipo Q (principio de equivalencia en T)

Las curvas de SEV de tipo Q no tienen ni máximos ni mínimos en los valores de $\bar{\rho}$, registrándose una disminución en el mismo al aumentar la separación AB. Según los valores de μ_1 y ν_1 , las zonas características de las curvas de SEV, por las que las mismas se diferencian entre sí, corresponden a distintos valores de $AB/2h_1$.

Para tener una idea de los límites de aplicación del principio de equivalencia en el corte de tipo Q, y de la relación mutua entre las posibles variaciones de μ_1 y ν_1 para que el corte quede prácticamente equivalente, se pueden construir diagramas de valores iguales de $\bar{\rho}/\rho_1$, para una serie de valores de la relación $AB/2h_1$, en función de μ_1 y ν_1 . De estos gráficos, partiendo de la condición de que los cortes cuyas curvas de SEV tengan valores de $\bar{\rho}$ que se diferencien entre sí en menos de $\pm 5\%$ son equivalentes, se puede obtener un diagrama construido de modo análogo a los formados para

cortes de tres capas de los otros tipos. Tal diagrama, para el caso $\rho_3=0$, se presenta en la figura 74.

Fig. 74.—Límites de aplicabilidad del principio de equivalencia en T para curvas de SEV de tres capas de tipo Q, para $\rho_3=0$ (por A. M. Pylaev).
 1.—Líneas correspondientes a la variación de μ_1 y ν_1 para capas equivalentes;
 2.—Límites de variación de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 entre los que se conserva el corte equivalente al corte dado de tipo Q, para $\rho_3=0$;
 3.—Zona de variación posible de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 para $\mu_1=1/9$ y $\nu_1=0,58$.



Las curvas de trazo interrumpido responden a una ley aproximada de variación simultánea de μ_1 y ν_1 , de modo que las capas se conserven equivalentes. Como se ve, el corte de tipo Q se aplica, con cierta aproximación, el principio de equivalencia en T. Sin embargo, en el corte de tipo Q, el valor de T_2 ya no permanece constante, para las capas equivalentes, como era el caso para el corte de tipo K. El diagrama demuestra que, para la obtención de gráficas de SEV prácticamente constantes, con ν_1 iniciales relativamente pequeñas ($\nu_1 \approx 2$), es necesario que al variar ρ_2 , h_2 varíe simultáneamente en una proporción menor y, recíprocamente, para valores de ν_1 inicialmente grandes, hay que hacer variar h_2 en una proporción mayor que ρ_2 .

Por ejemplo, dada una curva de tipo Q para el siguiente corte, $\mu_1=1/9=0,11$, $\nu_1=0,58$, $\rho_3=0$, el diagrama indica que la curva de SEV no cambiará prácticamente su forma inicial si la resistencia de la segunda capa aumenta hasta el valor $\mu_1=0,22$ o disminuye hasta $\mu_1=0,07$, si simultáneamente se disminuye h_2 hasta el valor $\nu_1=0,35$ o se aumenta hasta el valor $\nu_1=0,8$. Así pues, para poder conservar la equivalencia de las capas en el corte dado de tipo Q, se puede aumentar la resistividad ρ_2 dos veces o disminuirla 1,57 veces si, simultáneamente, se disminuye el espesor h_2 en 1,66 veces o se aumenta en 1,38 veces, respectivamente.

Comparando este diagrama con los correspondientes a los otros cortes, se puede afirmar que la zona de aplicación del principio de equivalencia es mucho menor para el corte de tipo Q que para los de tipo H, A y K.

El principio de equivalencia juega un gran papel en la práctica de la obtención gráfica de curvas de SEV y en su interpretación. Con frecuencia se sustituye en la construcción gráfica el corte de tres capas dado por uno equivalente a él en S o T. Si, por ejemplo, en la colección de curvas de SEV de tres capas no es posible encontrar la curva correspondiente a unos valores determinados de μ_1 y ν_1 , entonces se deducen los límites posibles de aplicación del principio de equivalencia para el corte dado y puesto que, dentro de estos límites, es posible aumentar o disminuir el valor de μ_1 (o de ν_1) hasta un valor μ'_1 (o ν'_1) existente en el ábaco, se puede tomar este último y calcular con su ayuda los valores correspondientes ν'_1 (o μ'_1) del corte equivalente. A continuación y para la construcción se puede utilizar esta curva de SEV de la colección que, a efectos prácticos, corresponde perfectamente al corte dado.

Sea, por ejemplo, el caso de que se necesita la curva de SEV $\mu_1 = 1/30$, $\nu_1 = 4$, $\rho_3 = \infty$, para corte de tipo H. No existe una curva calculada de SEV con tales parámetros. La curva de SEV inmediata en el ábaco tiene el valor $\mu_1 = 1/39$.

Observando, con ayuda del diagrama de la figura 71, que el corte dado permite dentro de los límites de aplicación del principio de equivalencia bajar μ_1 hasta $1/39$, hallamos el valor ν'_1 correspondiente a esta disminución, por la expresión:

$$\nu_1/\mu_1 = 120 = \nu'_1/\mu'_1$$

De aquí

$$\nu'_1 = 120/39 = 3,1$$

Así pues, tomando de la colección la curva de SEV con parámetros $\mu'_1 = 1/39$, $\nu'_1 = 3,1$, $\rho_3 = \infty$ (ábaco 86), se puede afirmar que, con un error inferior a $\pm 5\%$, la misma corresponde al corte dado.

Análogamente se calculan por este método los parámetros del corte equivalente, utilizando el principio de equivalencia en T:

$$\nu'_1 = \mu_1 \cdot \nu_1 / \mu'_1; \quad \mu'_1 = \mu_1 \cdot \nu_1 / \nu'_1 \quad (25)$$

Para el corte de tipo Q hay que tener en cuenta que, para las capas equivalentes, T_2 no permanece constante.

Con ayuda de los diagramas de A. M. Pylaev se puede hallar la expresión numérica de los límites de aplicación del principio de equivalencia para los cortes de los distintos tipos. Estos límites se indican en la tabla 9.

TABLA 9

LIMITES DE APLICACION DEL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA EN S Y T

Equivalencia en $S = \frac{h}{\rho}$			Equivalencia en $T = h \cdot \rho$		
ν_1 máxima para el que se pueden disminuir de modo indefinido los valores ν_1 y μ_1 dentro del límite de aplicación del principio de equivalencia	N.º máximo de aumentos admisibles de ν_1 y μ_1		ν_1 máxima para el que se puede aumentar μ_1 y disminuir ν_1 dentro de los límites de aplicación del principio de equivalencia	Cantidad máxima de disminución de μ_1 y aumento de ν_1 admisibles	
Corte de tipo H ($\rho_3 = \rho_1$)			Corte de tipo K ($\rho_3 = \rho_1$)		
μ_1	ν_1		μ_1	ν_1	
1/39	2	1,6	39	9	1,7
1/19	1	1,6	19	5	1,6
1/9	1	1,5	9	2	1,6
1/4	1/2	1,4	4	1/2	1,5
3/7	1/3	1,4	7/3	1/2	1,5
2/3	1/5	1,4	3/2	1/3	1,5
Corte de tipo A ($\rho_3 = \infty$)			Corte de tipo Q ($\rho_3 = 0$)		
μ_1	ν_1		μ_1	ν_1	
39	3	ilimitado	1/39	—	—
19	2	ilimitado	1/19	1/3	2,6-2,3
9	1	3,8	1/9	1/3	2,2-2,1
4	1	2,5	1/4	1/3	1,9-1,9
7/3	1	1,7	3/7	1/3	1,8-1,8
3/2	1	1,5	2/3	1/3	1,5-1,5

CURVAS DE SEV DE TIPO H

16. Variación de la posición del punto mínimo en la curva de SEV en función de los parámetros del corte

Las curvas de SEV de tipo H de tres capas se encuentran frecuentemente en la práctica, en los cortes eléctricos. Este tipo de curva de tres capas es de los más favorables para la interpretación, sobre todo si $\rho_3 = \infty$.

Existen curvas teóricas de SEV de tipo H calculadas, como ya indicamos, para valores de ρ_2/ρ_1 , iguales a 1/39, 1/9, 3/7, 1/4, 2/3 y $\rho_3/\rho_1 = \infty, 1$ y $(\rho_2/\rho_1)^{1/2}$. Además de éstas también hay curvas calculadas para ρ_2/ρ_1 igual a 1/300 y 1/100, para $\rho_3/\rho_1 = \infty$.

Las curvas de SEV de tipo H se pueden obtener de modo fácil gráficamente, utilizando el método de construcción citado en el apartado 14.

En la figura 75 se presentan ejemplos de curvas de SEV de tipo H. Una particularidad característica de las curvas de este tipo es la presencia de un mínimo en la resistividad aparente ($\bar{\rho}$). En las curvas quedan reflejadas las

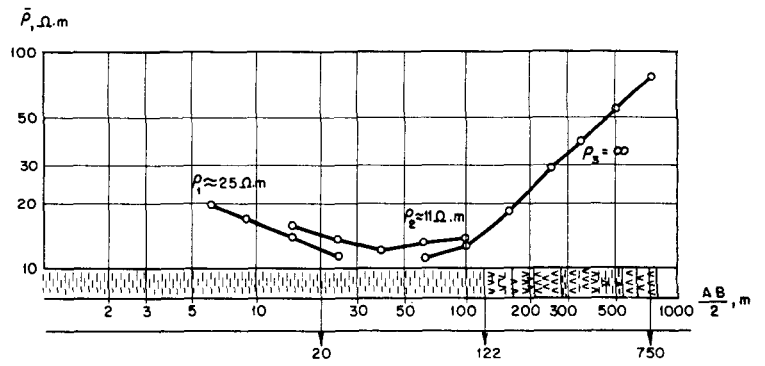


Fig. 75.—Ejemplo práctico de curva de SEV de tres capas de tipo H.
 1.—Arcillas;
 2.—Areniscas arcillosas;
 3.—Gravas;
 4.—Arenas;
 5.—Yesos;
 6.—Anhidritas.

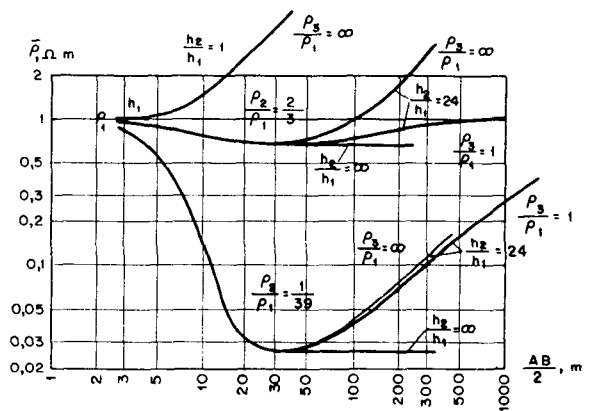
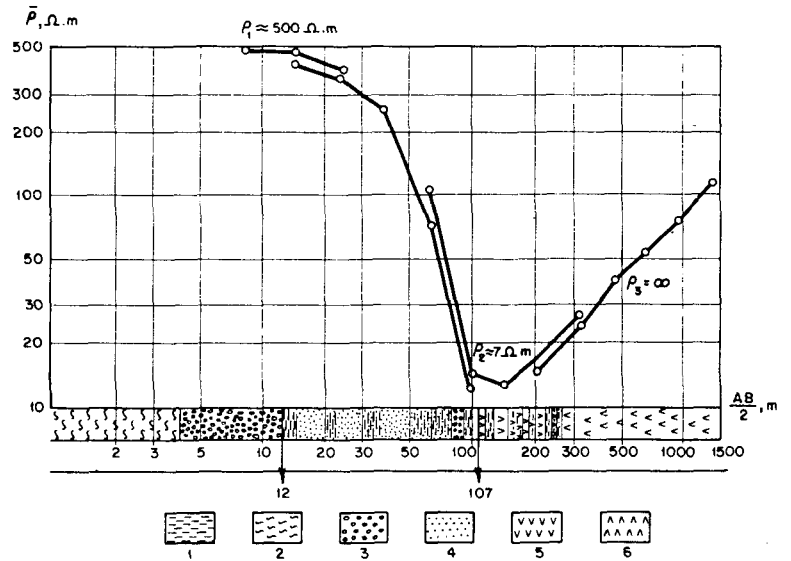


Fig. 76.—Carácter del valor mínimo de $\bar{\rho}$, en curvas de SEV de tipo H, para valores grandes de h_2/h_1 .

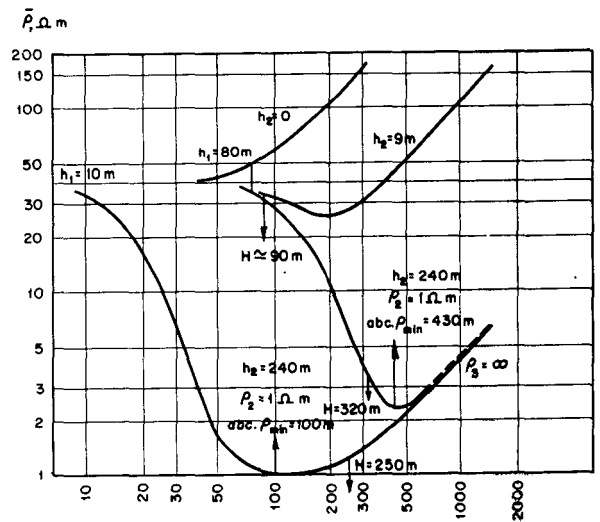
tres capas, siempre que el espesor h_2 del estrato conductor sea suficientemente grande respecto de h_1 y la resistividad ρ_2 pequeña en comparación con las ρ_1 y ρ_3 . La interpretación de estas curvas no presenta dificultad especial.

Se comprende fácilmente que, a igualdad de las restantes condiciones, el mínimo de la curva se acusará tanto más claramente cuanto mayor sea el espesor del horizonte conductor y menor su resistividad. Si el espesor h_2 de la capa intermedia aumenta mucho respecto a h_1 , la curva $\bar{\rho}$ se ensancha y el valor de $\bar{\rho}_{min}$ va aproximándose a la resistividad

verdadera de la capa intermedia. Para $h_2 \geq 20 h_1$, esta diferencia se hace muy pequeña, del orden de +5% del valor de ρ_2 (fig. 76).

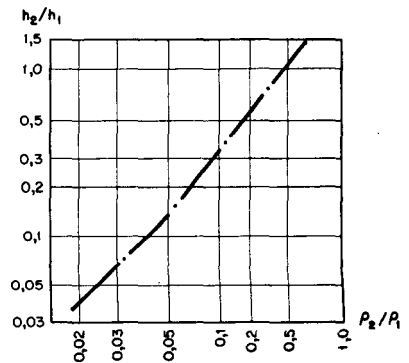
Cuanto menor es el espesor h_2 de la segunda capa respecto de h_1 , a igualdad de otras condiciones, tanto más se diferencia ρ_2 del valor $\bar{\rho}_{min}$ (fig. 77). Para valores de h_2 muy pequeños, ρ_{min} tiende a ρ_1 y en el límite, para $h_2 \rightarrow 0$, la curva de tres capas de tipo H se transforma en una curva de dos capas de tipo $\rho_1 < \rho_2$. Es comprensible que, al disminuir la diferencia entre ρ_2 y ρ_1 (aproximadamente ρ_2/ρ_1 a la unidad), cada vez se notará menos claramente el mínimo de $\bar{\rho}$ en la curva de SEV, observándose que para valores de h_2/h_1 suficientemente pequeños, ésta adquiere también el aspecto de una curva de dos capas (fig. 76).

Fig. 77.—Curvas de SEV de tipo H. Cambio de posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ al variar los parámetros del corte.



Como se indica más adelante, el tomar equivocadamente, en la interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H, las mismas como si fueran de dos capas, conduce a errores de consideración. Analizando las curvas calculadas de SEV, se pueden determinar de modo aproximado los valores mínimos de h_2/h_1 (fig. 78) para los que, en el corte de parámetros ρ_2/ρ_1 y $\rho_3 = \infty$, comienza a detectarse la capa conductora en la curva de SEV.

Fig. 78.—Valores mínimos del espesor relativo h_2/h_1 de la capa conductora, para los que la misma empieza a detectarse en las curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$).



El cambio de posición de las coordenadas del punto mínimo de la gráfica de SEV, por consiguiente, va unido de un modo u otro a las variaciones de los parámetros del corte. Por ello, estudiando la conducta del mínimo de las curvas de SEV de tipo H en la región explorada, se puede obtener, a veces, información útil respecto a los cambios de valor de la resistividad y espesor de la capa intermedia.

Veremos la relación existente entre las variaciones de las coordenadas del mínimo de las curvas de SEV de tipo H y las de los parámetros del corte.

Este análisis se realiza fácilmente utilizando las colecciones de curvas teóricas, no siendo posible citar todas sus particularidades con detalle. Tan sólo se tratará de los resultados fundamentales.

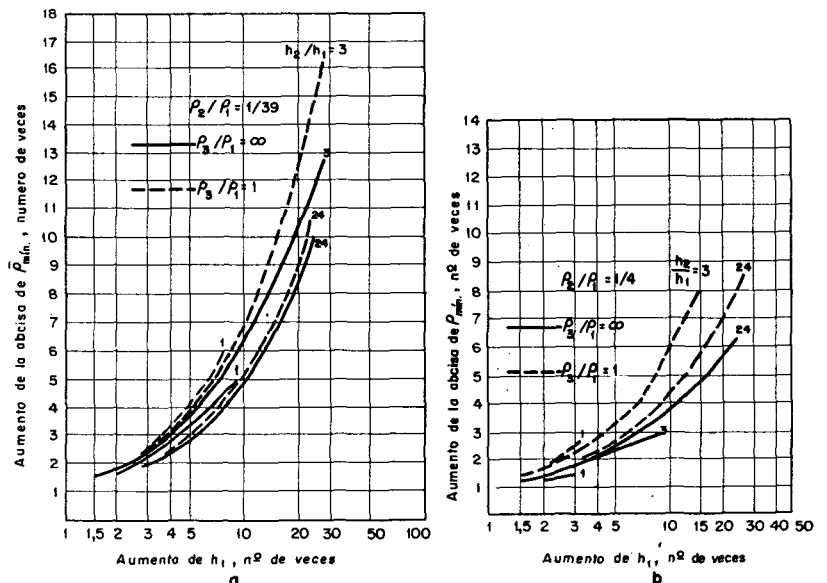
16.1. Variación de la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de tres capas en función de h_1 y ρ_1

Al crecer h_1 , crece la abcisa del punto ρ_{min} . Este aumento no es igual para los diversos cortes eléctricos de tipo H.

Sea, por ejemplo, un corte con los valores $\rho_2/\rho_1 = 1/39$, $h_2/h_1 = 24$, $\rho_3/\rho_1 = \infty$ (fig. 77). El análisis de las curvas de SEV calculadas para este caso demuestra que para un aumento del espesor h_1 de, por ejemplo, 8 veces, con h_2 constante, la abcisa del punto mínimo aumenta en 4,3 veces respecto a su valor inicial.

El índice de este crecimiento aumenta al disminuir hasta cierto límite el valor inicial de h_2/h_1 . El gráfico de la figura 79a muestra que si, por ejemplo, $h_2/h_1 = 3$, entonces, al aumentar h_1 ocho veces y permanecer constante h_2 , la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ aumenta en 5,5 veces. En caso de una

Fig. 79.—Influencia de la variación de h_1 en la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, en las curvas de SEV de tipo H.
a — para $\rho_2/\rho_1 = 1/39$;
b — para $\rho_2/\rho_1 = 1/4$.



disminución aún mayor de h_2/h_1 , el índice de aumento de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, disminuye. Por ejemplo, para $h_2/h_1 = 1$, al aumentar h_1 también en 8 veces, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ aumenta tan sólo 4,7 veces.

Como se aprecia en las figuras 79a y 79b, al disminuir los valores de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , el índice de crecimiento de la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece al crecer h_1 .

Por tanto, cuanto menor es el valor inicial de los parámetros h_2/h_1 (hasta ciertos límites), ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 en un corte dado de tipo H, tanto más acusada será la influencia de la variación de h_1 en la magnitud de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV.

Respecto a la influencia de la variación de ρ_1 en la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$, el estudio de las curvas calculadas de SEV demuestra que:

- La abscisa de $\bar{\rho}_{min}$, permaneciendo constantes los restantes parámetros del corte, crece al aumentar ρ_1 , pero en menor proporción que con el aumento de h_1 (fig. 80).
- El índice de aumento, como se aprecia en la figura 80, crece al disminuir el valor inicial de h_2/h_1 y disminuye al hacerlo ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 .

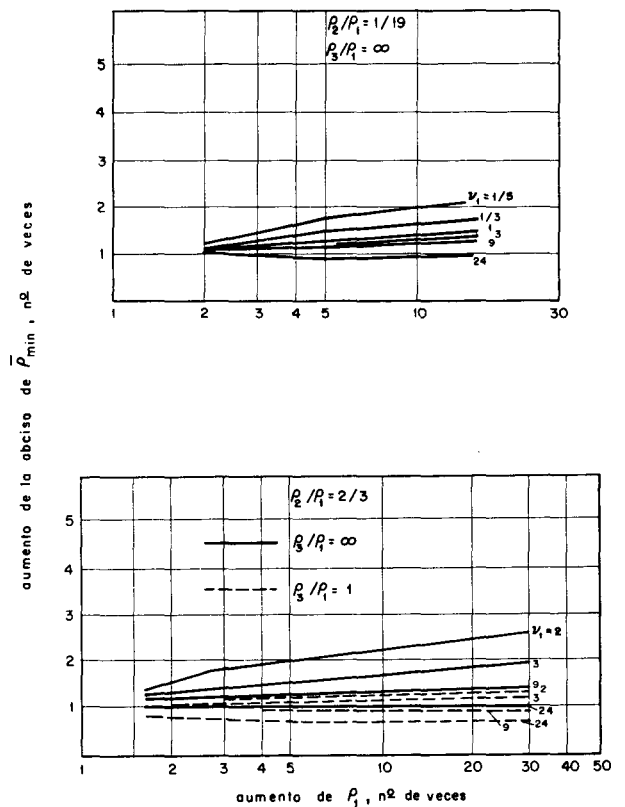


Fig. 80.—Influencia de la variación de la variación de ρ_1 en la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV de tipo H.

16.2. Variación de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ en función de h_2 , ρ_2 y ρ_3

Al aumentar h_2 , permaneciendo invariables los restantes parámetros del corte, la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV también aumenta (fig. 81). El índice de crecimiento aumenta al crecer (hasta cierto límite) el valor inicial de h_2/h_1 y disminuye al hacerlo los valores iniciales de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 (fig. 82).

Es interesante señalar que, para unos parámetros iniciales dados del corte, la variación de h_1 , en caso de ρ_2/ρ_1

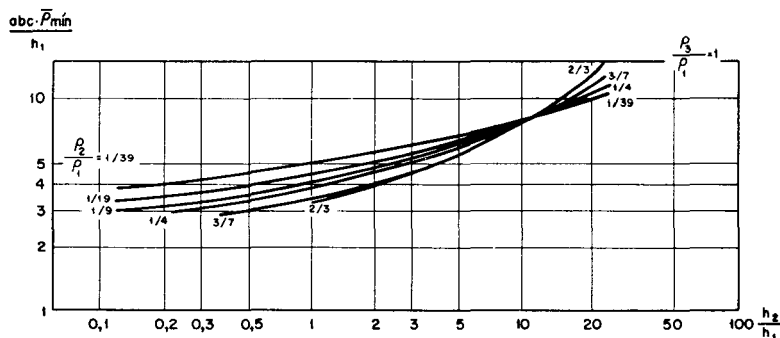
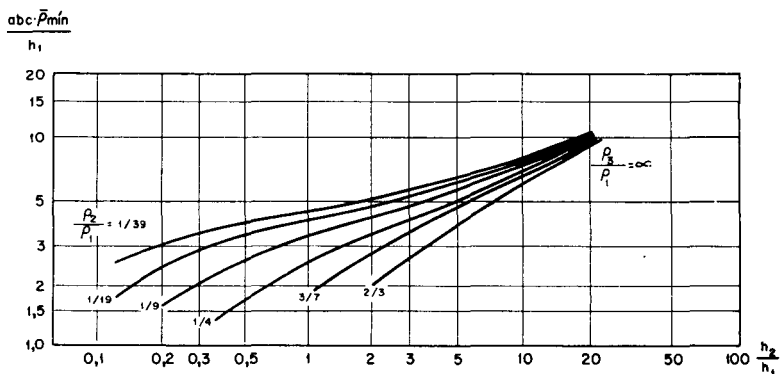


Fig. 81.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de

$$\frac{abc \cdot \bar{\rho}_{min}}{h_1} \text{ de } \frac{h_2}{h_1}$$

para $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \text{const.}$

relativamente pequeño, tiene mayor influencia sobre la magnitud de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ que la misma variación de h_2 .

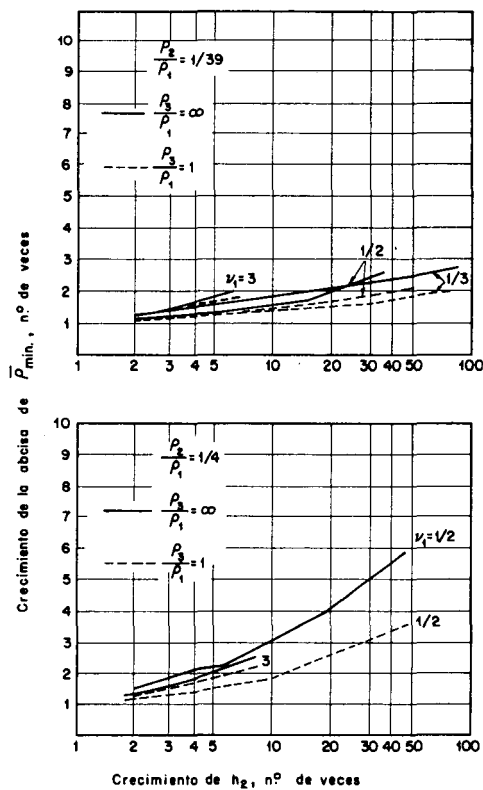


Fig. 82.—Curvas de SEV de tipo H. Influencia de la variación de h_2 en la magnitud de la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$.

Esto se ve por ejemplo en la tabla 10 en la que se presenta la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, al aumentar h_1 y h_2 dos veces respecto a su valor inicial.

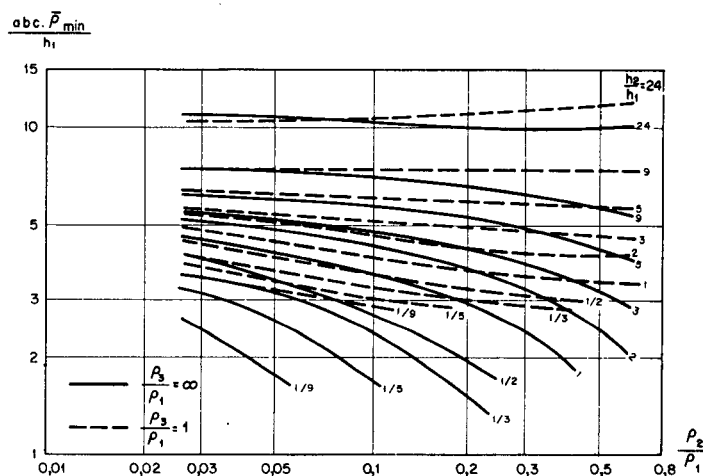
TABLA 10

INFLUENCIA DE LA VARIACION DE h_1 y h_2 EN LA MAGNITUD DE LA ABCISA DE $\bar{\rho}_{min}$

Parámetros iniciales			Aumento de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ (n.º de veces) al aumentar dos veces	
μ_1	ρ_3	ν_1	h_1	h_2
1/39	∞	1/2	1,7	1,2
		1	1,7	1,2
		5	1,7	1,2
1/9	∞	1/2	1,5	1,3
		1	1,6	1,2
		5	1,6	1,2
1/4	∞	1/2	1,2	1,5
		1	1,3	1,4
		5	1,5	1,3

Al crecer ρ_2 la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ disminuye (fig. 83). El índice de esta disminución aumenta al bajar el valor inicial de h_2/h_1 , y aumentar ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 . Para valores de h_2/h_1 grandes y pequeños de ρ_3/ρ_1 , la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ no varía e incluso aumenta al aumentar ρ_2 .

Fig. 83.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de abc. $\bar{\rho}_{min}/h_1$ de ρ_2/ρ_1 para $h_2/h_1 = \text{cte.}$



Así, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece al aumentar ρ_1 y disminuye al crecer ρ_2 .

Comparemos la influencia de estos dos parámetros, para la misma variación de ambos y diferentes relaciones iniciales de los parámetros del corte. En el ejemplo se aumenta ρ_1 y ρ_2 dos y cuatro veces (tabla 11).

La tabla 11 evidencia que la influencia de la variación de ρ_1 y ρ_2 en la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ es aproximadamente igual y de signo opuesto.

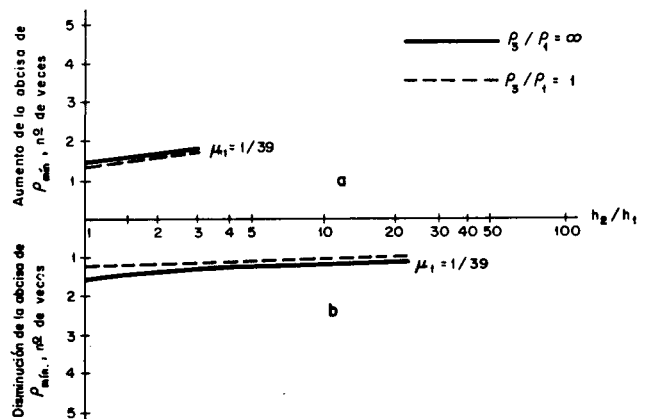
TABLA 11

INFLUENCIA DE LA VARIACION DE ρ_1 Y ρ_2 EN LA MAGNITUD DE LA ABCISA DE $\bar{\rho}_{min}$

Parámetros iniciales del corte			Aumento en			
			dos veces de		cuatro veces de	
			ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2
ρ_2/ρ_1	ρ_3/ρ_1	h_2/h_1	Aumento de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$	Disminución de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$	Aumento de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$	Disminución de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$
1/39	∞	1/2	1,15	1,2	1,2	1,5
		1	1,10	1,2	1,2	1,4
		3	1,0	1,05	1,2	1,2
		9	0,98	1,0	1,1	1,1
		24	0,95	1,0	1,0	1,1
1/9	∞	1/2	1,2	—	1,5	—
		1	1,2	1,3	1,4	2,0
		3	1,1	1,2	1,2	1,3
		9	1,0	1,1	1,1	1,15
		24	1,0	1,05	1,0	1,05
1/4	∞	1/2	1,6	—	—	—
		1	1,4	—	1,5	—
		3	1,1	1,3	1,2	—
		9	1,0	1,2	1,0	—
		24	1,0	1,0	1,0	—

Asimismo, el gráfico de la figura 84 demuestra que el aumento de ρ_2 , al menos para h_2/h_1 pequeño ($h_2/h_1 \leq 3$), influye en la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ en menor grado que el aumento de h_2 .

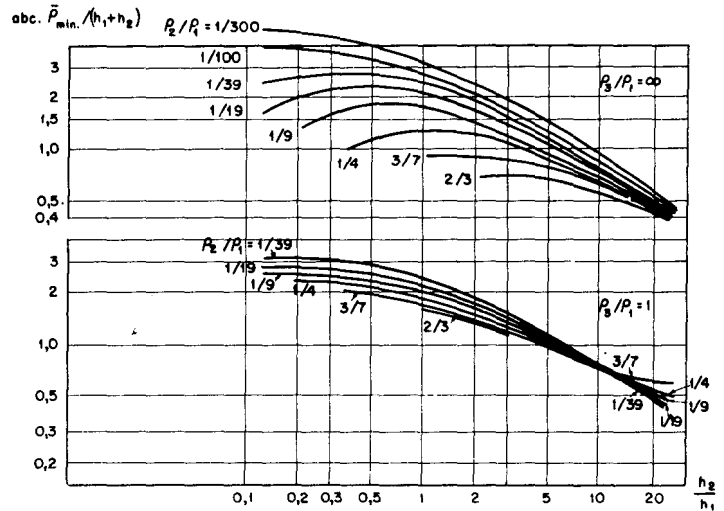
Fig. 84.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ al aumentar h_2 y ρ_2 . a.—al aumentar h_2 seis veces; b.—al aumentar ρ_2 seis veces.



Por último, la influencia de la variación de ρ_3 en la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ se refleja en el aumento de la misma al disminuir ρ_3 , permaneciendo constantes los restantes parámetros del corte. El grado de este aumento es tanto mayor cuanto menor es h_2/h_1 y mayor ρ_2/ρ_1 . Por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 1/39$ y $h_2/h_1 = 5$, al disminuir ρ_3/ρ_1 desde ∞ a 1 y 0,16, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece en un 2% y 17%, respectivamente.

Para $h_2/h_1 = 1$ y las mismas condiciones restantes, la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ pasa ya a 4% y 22%.

Fig. 85.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de abc. $\bar{\rho}_{min}/(h_1+h_2)$ de h_2/h_1 para $\rho_2/\rho_1 = cte.$



Para $\rho_2/\rho_1 = 1/4$ y $h_2/h_1 = 5$, con disminución de ρ_3/ρ_1 desde ∞ a 1 y 0,5, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece hasta el 12% y 27%.

Si $h_2/h_1 = 1$, para idénticas condiciones restantes, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece hasta el 42% y 100% aproximadamente.

Así pues, para h_2/h_1 pequeño y ρ_2/ρ_1 grande, la influencia de la variación de ρ_3 en la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV de tipo H se acusa de modo considerable.

16.3. Variación de la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ en función de h_1+h_2

Para la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo H, es útil el análisis de la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ para valores característicos de la profundidad h_1+h_2 del horizonte de apoyo.

En la figura 85 se presentan una serie de gráficos que muestran la variación de la relación $(abc. \bar{\rho}_{min})/(h_1+h_2)$ en función de h_2/h_1 , para valores constantes de ρ_2/ρ_1 , $\rho_3/\rho_1 = \infty$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$.

En el gráfico se ve que, para valores pequeños de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ siempre supera el valor de la profundidad h_1+h_2 del horizonte de apoyo. Este exceso, en el caso de, por ejemplo, $h_2/h_1 = 1/5 \div 1/3$ y $\rho_2/\rho_1 = 1/300$, llega a ser el triple del valor de la profundidad. Por consiguiente, para relativamente pequeños valores de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 el punto mínimo de la curva de SEV está siempre a la derecha del índice que marca en el impreso de SEV la profundidad del horizonte de apoyo.

Al aumentar h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , la relación (abc. $\bar{\rho}_{min}$)/($h_1 + h_2$) disminuye. Para cierta relación de los parámetros, la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ es igual a la profundidad del horizonte de apoyo. Con un aumento ulterior de h_2/h_1 , el punto mínimo de la curva de SEV queda ya a la izquierda del índice de profundidad (abc. $\bar{\rho}_{min}/(h_1 + h_2) < 1$). En el caso de valores grandes de h_2/h_1 ($h_2/h_1 \geq 20$) con independencia de los valores de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , la profundidad del horizonte de apoyo excede bastante del valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ (abc. $\bar{\rho}_{min}/(h_1 + h_2) = 0,6 \div 0,4$).

Para dar una idea de los valores de h_2/h_1 , para los que la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ pasa a ser igual a la profundidad del horizonte de apoyo, se ha confeccionado la tabla 12 con valores de h_2/h_1 , correspondientes a la relación abc. $\bar{\rho}_{min}/(h_1 + h_2) = 1$, cuyos datos están basados en el gráfico indicado (fig. 85). En dicha tabla, en la que se dan también los valores de h_2/h_1 para $\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$, se ve que al aumentar ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 el espesor relativo de la segunda capa (h_2/h_1), para el que la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ indica la profundidad del horizonte de apoyo, disminuye.

Por tanto, si la relación de parámetros del corte de tres capas de tipo H investigado, está próxima a las de los valores de la tabla 12, se puede suponer que la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ reflejará la marcha del horizonte de apoyo resistivo.

En el ejemplo de la figura 86 se ve claramente la relación entre la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ y la profundidad del horizonte de apoyo, según resultados de sondeos mecánicos. Este ejemplo pertenece a una investigación efectuada en la provincia de Penza, en la que como horizonte de apoyo resistivo se tiene una caliza del Carbonífero.

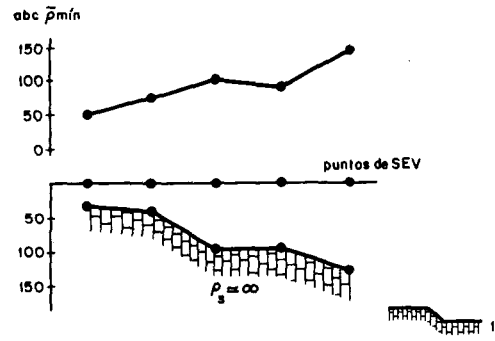
Pasemos a ver la influencia de los parámetros del corte en la magnitud de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV de tipo H.

TABLA 12

VALORES DE h_2/h_1 , Y OTROS PARAMETROS DEL CORTE DE TRES CAPAS DE TIPO H PARA LOS QUE LA ABCISA DE $\bar{\rho}_{min}$ DE LA CURVA DE SEV ES IGUAL A LA PROFUNDIDAD DEL HORIZONTE DE APOYO

ρ_2/ρ_1	Valores de h_2/h_1		
	Para $\rho_3/\rho_1 = \infty$	Para $\rho_3/\rho_1 = 1$	Para $\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
1/300	8,0	—	—
1/100	7,0	—	—
1/39	6,0	6,0	7,0
1/19	5,0	5,5	6,5
1/4	3,0; 0,33	4,5	6,5
3/7	para todos h_2/h_1	4,5	8,0
2/3	abc. de $\bar{\rho}_{min}$ es menor que h_2+h_1	4,5	9,0

Fig. 86.—Curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 \approx \infty$). Relación entre la variación de la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ y la profundidad del horizonte de apoyo. 1.—Superficie de la caliza.



16.4. Variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ en función de h_1 y ρ_1

El análisis de las curvas calculadas de tres capas de SEV de tipo H demuestra que, al aumentar h_1 , la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ crece. El grado de este aumento, para valores constantes de las relaciones ρ_2/ρ_1 , ρ_3/ρ_1 y de h_2 , crece al disminuir el valor inicial h_2/h_1 hasta cierto límite (aproximadamente hasta $h_2/h_1 = 3$) y baja para valores iniciales pequeños de h_2/h_1 . El grado de este aumento crece también al disminuir el valor inicial de ρ_2/ρ_1 y aumentar el de ρ_3/ρ_1 (fig. 87).

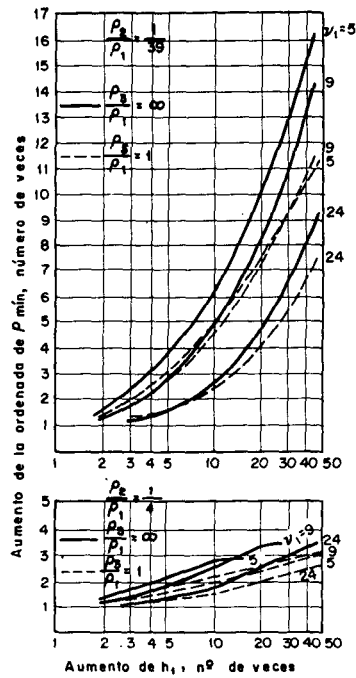


Fig. 87.—Curvas de SEV de tipo H. Influencia de la variación de h_1 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

De aquí se deduce que la influencia de la variación de h_1 en el crecimiento de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV de tipo H, será tanto mayor cuanto menor sea el valor inicial de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 (hasta cierto límite) y mayor ρ_3/ρ_1 .

La ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ aumenta también al crecer ρ_1 (fig. 88). Si la proporción de los restantes parámetros del corte permanece constante, entonces el grado de crecimiento aumenta al disminuir el valor inicial de h_2/h_1 , poco para h_2/h_1 relativamente grande (aproximadamente hasta $h_2/h_1 = 3$), y

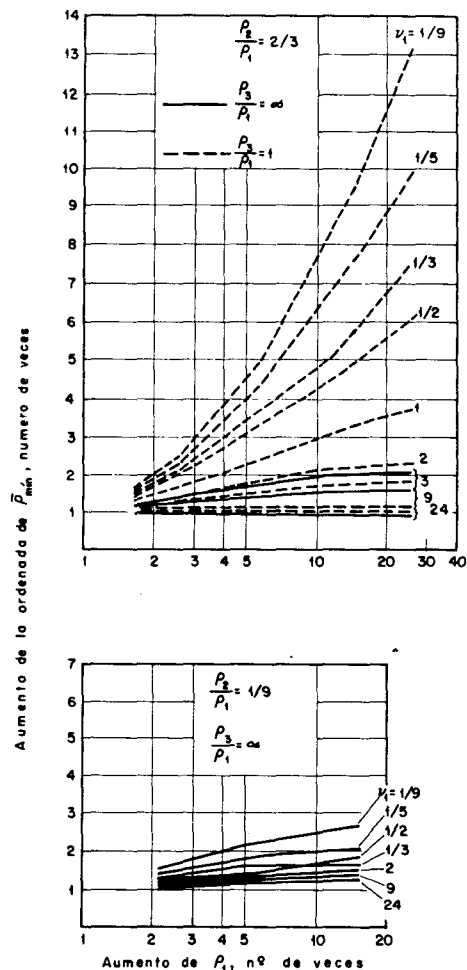


Fig. 88.—Curvas de SEV de tipo H. Influencia de la variación de ρ_1 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

mucho más para h_2/h_1 pequeño. Al disminuir el valor inicial de ρ_2/ρ_1 , el grado de crecimiento baja y al decrecer ρ_3/ρ_1 , sube.

Así pues, la influencia de la variación de ρ_1 en la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ será tanto mayor cuanto menor sea el valor inicial de h_2/h_1 y ρ_3/ρ_1 , y mayor ρ_2/ρ_1 .

Se ve que al aumentar h_1 y ρ_1 la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ crece. Para otras condiciones iguales, tiene mayor influencia en la magnitud de $\bar{\rho}_{min}$, como se ve al analizar las curvas de SEV, la variación de h_1 que la de ρ_1 (fig. 89).

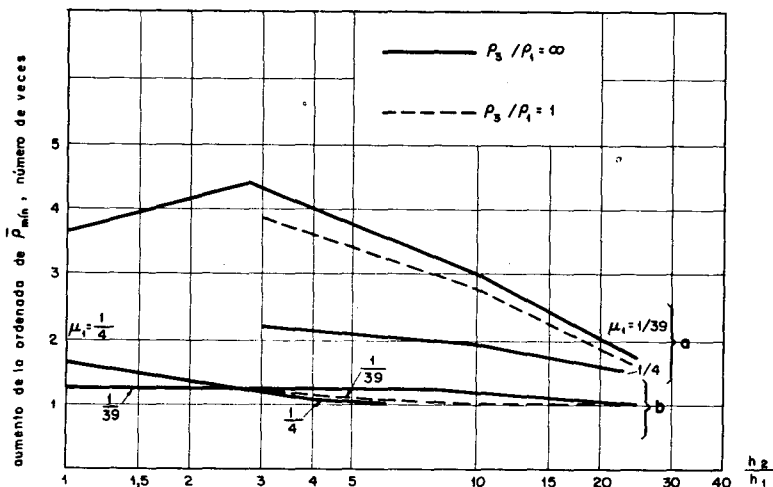


Fig. 89.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ al crecer h_1 y ρ_1 .
a.—al crecer h_1 seis veces;
b.—al crecer ρ_1 seis veces.

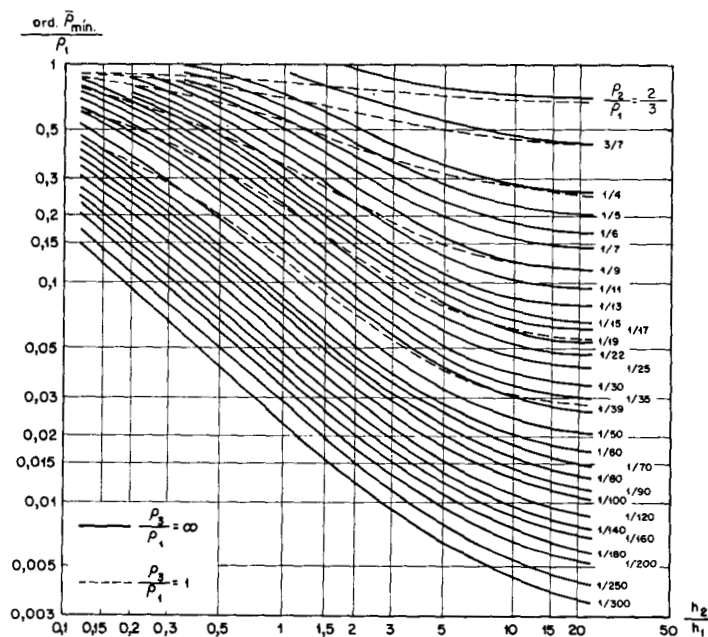
16.5. Variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ en función de h_2 , ρ_2 y ρ_3

Al crecer h_2 , la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ disminuye. El carácter de esta disminución se observa en la figura 90.

La influencia de la variación de h_2 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ será tanto mayor cuanto menores sean los valores iniciales de ρ_2/ρ_1 , h_2/h_1 (hasta cierto límite) y mayor ρ_3/ρ_1 .

La variación de h_1 y h_2 , como vemos, produce en la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ influencias opuestas: el aumento de h_1 suscita un aumento de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, y el de h_2 la disminución de la misma.

Fig. 90.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de ord. ρ_{min}/ρ_1 de h_2/h_1 , para $\rho_2/\rho_1 = cte.$



Por tanto, si simultáneamente se aumentan o disminuyen h_1 y h_2 , permaneciendo constantes los demás parámetros del corte, un mismo número de veces, no se produce variación en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

La ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ crece al crecer ρ_2 (fig. 91). El grado de este crecimiento, como se ve, sube al aumentar el valor de h_2/h_1 inicial, al disminuir ρ_2/ρ_1 (para $h_2/h_1 > 1$) y al aumentar ρ_3/ρ_1 .

El valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, por consiguiente, crece al aumentar ρ_1 y ρ_2 . Con todo, la variación de ρ_2 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, al menos para $\rho_3 = \infty$, tiene mayor influencia que la variación de ρ_1 (tabla 13).

Si se compara la influencia de la variación de ρ_2 y h_2 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 1/39$ (fig. 92), se puede concluir que, al crecer ρ_2 crece la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ en mucha mayor proporción que decrece esta misma ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ al crecer h_2 el mismo número de veces.

TABLA 13

INFLUENCIA DE LA VARIACION DE ρ_1 Y ρ_2 EN LA ORDENADA DE $\bar{\rho}_{min}$ DE LA CURVA DE SEV DE TRES CAPAS DE TIPO H

Parámetros iniciales del corte			Aumento de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ (en n.º de veces) al crecer cuatro veces	
ρ_2/ρ_1	ρ_3/ρ_1	h_2/h_1	ρ_1	ρ_2
1/39	∞	1/2	1,3	2,5
		1	1,3	3,0
		3	1,2	3,0
		9	1,1	3,5
		24	1,0	3,5
1/9	∞	1/2	1,6	—
		1	1,4	2,2
		3	1,0	3,2
		9	1,0	3,9
		24	1,0	4,0

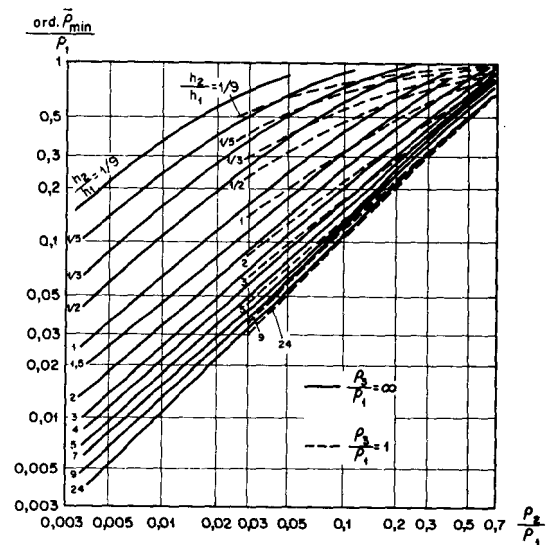


Fig. 91.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ de ρ_2/ρ_1 , para $h_2/h_1 = cte.$

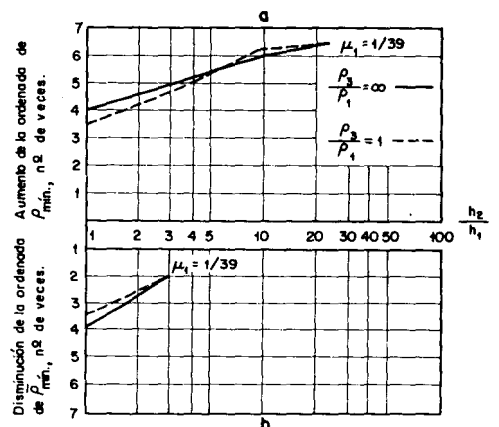


Fig. 92.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ al crecer h_2 y ρ_2 . a.—Al aumentar ρ_2 seis veces; b.—Al aumentar h_2 seis veces.

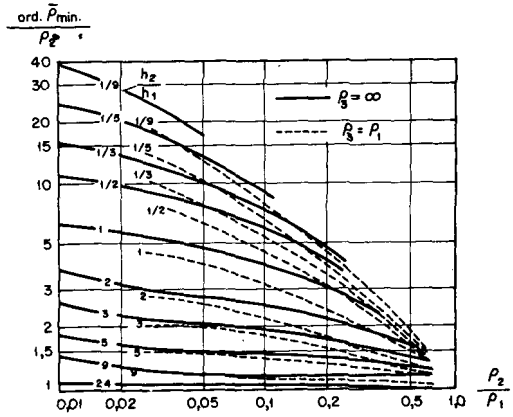


Fig. 93.—Curvas de SEV de tipo H. Dependencia de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_2$ de ρ_2/ρ_1 para $h_2/h_1 = cte.$

La variación de la relación de ordenadas, $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$, para diferentes valores de ρ_2/ρ_1 , h_2/h_1 , ρ_3/ρ_1 , se aprecia en la figura 93. En el gráfico se observa que para valores pequeños de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , el valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ puede exceder bastante del valor verdadero de ρ_2 . En caso de valores grandes de h_2/h_1 , el valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, sobre todo al aumentar ρ_2/ρ_1 , se aproxima a ρ_2 . Prácticamente, la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ es igual a ρ_2 para $h_2/h_1 \geq 20$ y $\rho_2/\rho_1 \geq 0,5$.

Veamos la influencia de la variación de ρ_3 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

El análisis de las curvas calculadas de SEV de tipo H demuestra que, permaneciendo constantes los demás parámetros del corte, la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ disminuye al bajar ρ_3 . La misma disminuye mucho para valores pequeños de h_2/h_1 y de modo casi imperceptible para $h_2/h_1 \geq 9$. Por ejemplo, para $h_2/h_1 = 9$ y $\rho_2/\rho_1 = 1/19$, el descenso de ρ_3/ρ_1 de ∞ a 0,23 lleva consigo un descenso del valor de $\bar{\rho}_{min}$ de sólo 2%; para las mismas condiciones, pero $h_2/h_1 = 1$, la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ baja ya cerca de un 40%.

En los gráficos de la figura 94 se presenta el grado de disminución de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV al disminuir ρ_3/ρ_1 , de $\infty - 1$ y de ∞ a $(\rho_2/\rho_1)^{1/2}$ para dos valores extremos de ρ_2/ρ_1 , igual a 1/39 y 2/3. La disminución está indicada en tanto por ciento del valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ para los parámetros iniciales del corte. Este gráfico, que permite estimar la influencia de la variación de ρ_3 en la magnitud de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, da la posibilidad de hallar con facilidad los valores mínimos de h_2/h_1 (para diferentes valores de ρ_2/ρ_1) para los que la variación de ρ_3 no se refleja prácticamente en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ (tabla 14) de la curva de SEV.

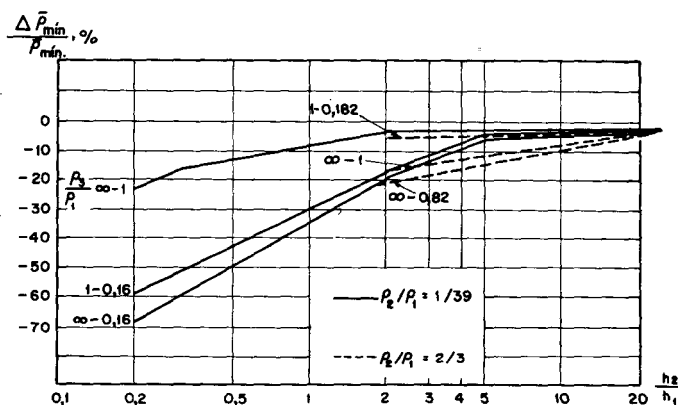
La tabla 14 pone de manifiesto que si, por ejemplo, se tiene un corte en que $\rho_3 = \infty$, h_2/h_1 notoriamente mayor que 3 y $\rho_2/\rho_1 \geq 1/9$, entonces no es de esperar que, aún para valores muy bajos de ρ_3 , se produzcan variaciones en la magnitud de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

TABLA 14

PARAMETROS DEL CORTE DE TRES CAPAS DE TIPO H PARA LOS QUE LA VARIACION DE ρ_3/ρ_1 NO TIENE INFLUENCIA APRECIABLE EN LA MAGNITUD DE LA ORDENADA DE $\bar{\rho}_{min}$ EN LAS CURVAS DE SEV DE TIPO H

Parámetros iniciales del corte		Disminución de ρ_3/ρ_1	Valores mínimos de h_2/h_1 para los que la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ no disminuye en más del 5%
ρ_2/ρ_1	ρ_3/ρ_1		
1/39	∞	hasta 1	1,6
1/19	∞	hasta 1	3
1/9	∞	hasta 1	9
1/4	∞	hasta 1	15
2/3	∞	hasta 1	17
1/39	1	hasta 0,16	7
1/19	1	hasta 0,23	5
1/9	1	hasta 0,33	4,8
1/4	1	hasta 0,50	4,6
2/3	1	hasta 0,82	2,5

Fig. 94.—
Influencia de ρ_3 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV de tipo H.



Resumiendo lo dicho sobre la influencia de los parámetros del corte de tres capas de tipo H en la posición del punto mínimo de la curva de SEV, podemos decir (fig. 95):

- a) Al crecer h_1 y ρ_1 , las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ crecen. La mayor influencia en la posición de $\bar{\rho}_{min}$ procede de la variación de h_1 . El aumento de ρ_1 , sobre todo, para valores iniciales pequeños de ρ_2/ρ_1 y grandes de h_2/h_1 , no suscita grandes variaciones en las coordenadas de $\bar{\rho}_{min}$.
- b) Al crecer h_2 , la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece y la ordenada disminuye. Para valores pequeños de ρ_2/ρ_1 la influencia de la variación de h_2 en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ es mayor que en la abscisa. Para valores de la relación ρ_2/ρ_1 próximos a la unidad, por el contrario, el aumento de h_2 tiene mayor influencia en la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$.
- c) El aumento de ρ_2 supone la disminución de la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ y el crecimiento de su ordenada. Esta variación de ρ_2 influye

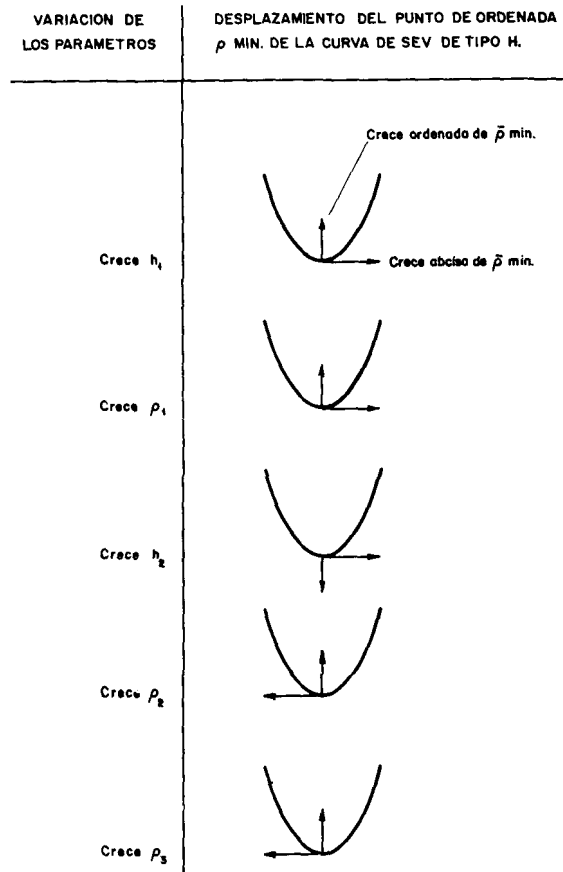


Fig. 95.—
Características cualitativas del desplazamiento del punto de ordenada $\bar{\rho}$ min. de la curva de SEV de tipo H en función de la variación de los parámetros del corte.

en mucho mayor grado en la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ que en su abscisa, sobre todo para valores grandes de h_2/h_1 .

- d) El crecimiento de ρ_3 origina la disminución de la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ y el crecimiento de su ordenada. Para valores pequeños de h_2/h_1 , estas variaciones alcanzan grandes proporciones. La variación de ρ_3 influye mucho más en la abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ que en su ordenada, sobre todo para valores grandes de ρ_2/ρ_1 .

17. Relación entre la conductancia longitudinal total. Los parámetros de las capas del corte y las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV

Sabemos que para el caso $\rho_n = \infty$, la rama final de la curva de SEV forma un ángulo de 45° con el eje de abscisas y al mismo tiempo la prolongación de esta rama corta en dicho eje ($\bar{\rho} = 1$) un segmento numéricamente igual al valor de S , suma de las conductancias longitudinales de las $n-1$ capas que descansan sobre el horizonte de apoyo:

$$S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + \dots + h_{n-1}/\rho_{n-1}$$

Para tener una idea general, mediante el análisis cualitativo de las curvas de SEV, de la variación posible de la resistividad o del espesor de las capas conductoras que descansan sobre un horizonte de apoyo infinitamente resistente, es frecuentemente útil estudiar la relación entre las variaciones de S y la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV.

Utilizando los ábacos de curvas de SEV de tres capas de tipo H, hallamos en primer lugar la relación gráfica existente entre

la magnitud S , en el corte de este tipo, y los valores de los parámetros h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 de la capa conductora.

Para el corte de tres capas

$$S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2$$

$$S/S_1 = 1 + \nu_1/\mu_1$$

En las figuras 96 y 97 se representan las variaciones de S/S_1 , en función de μ_1 y ν_1 .

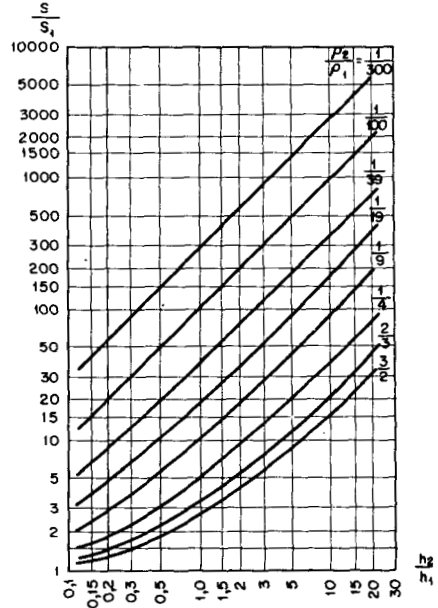


Fig. 96.—Curvas de SEV de tipo H; $\rho_3 = \infty$. Variación de S/S_1 en función de h_2/h_1 .

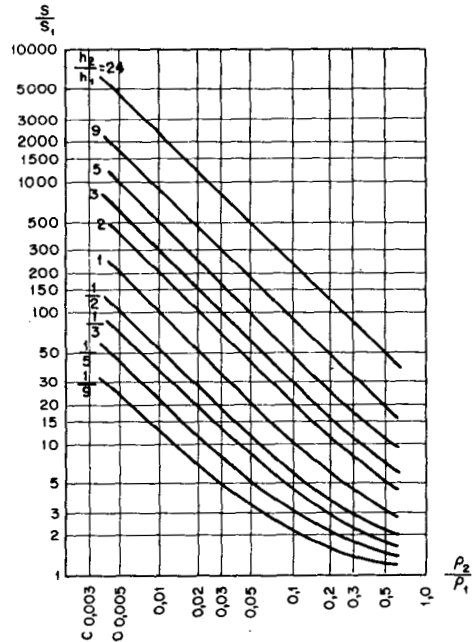


Fig. 97.—Curvas de SEV de tipo H; $\rho_3 = \infty$. Variación de S/S_1 en función de ρ_2/ρ_1 .

S aumenta de modo claro al crecer h_2 , sobre todo, si ρ_2/ρ_1 es pequeño y el valor inicial de h_2/h_1 suficientemente grande.

Al crecer ρ_2 el valor de S baja, sobre todo lo hace intensamente para grandes valores de h_2/h_1 .

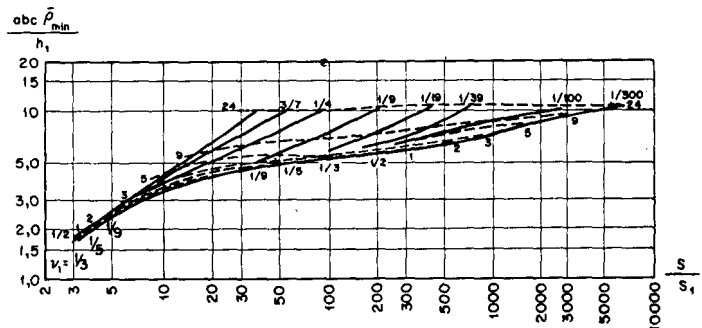
Por consiguiente, el crecimiento de S/S_1 , si una de las dos relaciones μ_1 o ν_1 permanece constante, evidencia un aumento de h_2/h_1 o disminución de ρ_2/ρ_1 . Si h_1/ρ_1 es muy pequeño en comparación con h_2/ρ_2 , como suele ocurrir con frecuencia en el corte de tipo H, se puede, sin grandes errores, tomar $S = h_2/\rho_2$. En estas condiciones, S creciente puede relacionarse con h_2 creciente, ρ_2 decreciente o con ambas causas a la vez. Puede ocurrir que ambos parámetros varíen simultáneamente, pero en grado diferente de crecimiento y decrecimiento.

En caso de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 variables (lo que ocurre con frecuencia en la práctica) no siempre se puede aclarar cuál sea la causa preponderante de la variación de S/S_1 .

Se puede, en tal caso, obtener cierta ayuda mediante el estudio de la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV. Si tal análisis no conduce a una solución simple del problema, se puede, en muchos casos, disminuir el número posible de soluciones que origina la variación de la magnitud S/S_1 . Veamos esto con más detalle.

Hallemos, con ayuda de las curvas de SEV teóricas, la relación entre la magnitud S/S_1 y los valores de las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ de estas curvas (figs. 98 y 99). Un examen detallado de estos gráficos demuestra que, por ejemplo, al crecer S/S_1 , pasando de un punto de SEV a otro se tienen cinco combinaciones posibles de las variaciones de abcisas y ordenadas del punto de las curvas (tabla 15). A estas variaciones corresponden otras determinadas de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 .

Fig. 98.—Curvas de SEV de tipo H.
 $\rho_3 = \infty$.
 Relación entre S/S_1 y abc $\bar{\rho}_{min}/h_1$.



Si S/S_1 permanece constante, entonces sólo existen tres combinaciones posibles de variaciones de abcisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva (tabla 16). Estas conclusiones son ciertas, desde luego, con la condición de que los cortes que corresponden a las curvas de SEV no sean equivalentes.

Si al pasar de una curva de SEV de tipo H (fig. 100, curva I) a otra (fig. 100, curva II) tenemos que la relación S/S_1 aumenta, la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ permanece constante y la ordenada del mismo decrece. Entonces las cinco causas posibles del crecimiento de S/S_1 quedan reducidas a una: el crecimiento observado de S/S_1 es causado por el decrecimiento en el punto de SEV II del valor h_2/h_1 y por una disminución aún

más brusca de ρ_2/ρ_1 . Si es posible valorar fácilmente el espesor h_1 , y la resistividad ρ_1 , de la primera capa, se puede juzgar sobre la variación cualitativa de los parámetros de la segunda capa. En el ejemplo examinado, los valores de h_1 y ρ_1 son los mismos; por consiguiente, en el punto de SEV II, h_2 decrece y aún mucho más decrece ρ_2 en comparación con los valores de estos mismos parámetros en el punto de SEV I.

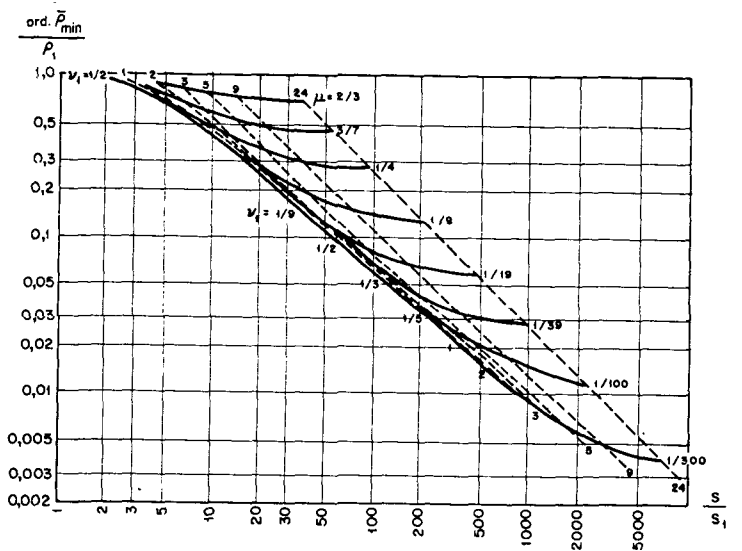


Fig. 99.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 = \infty$. Relación entre S/S_1 y ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$.

TABLA 15

CRECIMIENTO DE S/S_1 , AL VARIAR LA SITUACIÓN DEL PUNTO $\bar{\rho}_{min}$ DE LA CURVA DE SEV DE TIPO H Y LOS PARÁMETROS DEL CORTE




Caso	Variación de $\frac{abc. \bar{\rho}_{min}}{h_1}$	Variación de $\frac{ord. \bar{\rho}_{min}}{\rho_1}$	Situación relativa de las curvas de SEV	Variación posible de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1
1	Constante	Disminuye		h_2/h_1 disminuye ρ_2/ρ_1 disminuye más fuertemente
2	Aumenta	Constante		h_2/h_1 aumenta ρ_2/ρ_1 aumenta menos bruscamente
3	Aumenta	Aumenta		h_2/h_1 aumenta ρ_2/ρ_1 aumenta menos bruscamente
4	Aumenta	Disminuye		h_2/h_1 aumenta ρ_2/ρ_1 disminuye o no varía h_2/h_1 no varía ρ_2/ρ_1 disminuye
5	Disminuye	Disminuye		h_2/h_1 disminuye ρ_2/ρ_1 disminuye más bruscamente

Análogamente al ejemplo examinado se puede también, en los casos 2, 3 y 5 (tabla 15) calcular fácilmente la causa del crecimiento de S/S_1 , y solamente en el caso 4 el problema no presenta una solución única.

Fácilmente se ve que para la disminución observada de S/S_1 , de una curva de SEV a otra, todas las conclusiones anteriores quedan en vigor, si el sentido de variación de los parámetros h_2/h_1 , y ρ_2/ρ_1 , se invierte.

TABLA 16

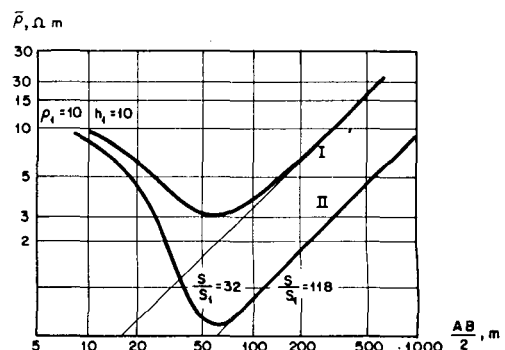
VARIACIONES POSIBLES DE h_2/h_1 Y ρ_2/ρ_1 EN EL CORTE DE TIPO H, PARA S/S_1 CONSTANTE

Caso	Variación de $\frac{\text{abc. } \bar{\rho}_{min}}{h_1}$	Variación de $\frac{\text{ord. } \bar{\rho}_{min}}{\rho_1}$	Situación relativa de las curvas de SEV	Variación posible de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1
1	Constante	Constante		h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 constantes
2	Aumenta	Aumenta		h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 aumentan
3	Disminuye	Disminuye		h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 disminuyen

Comparando, en el proceso de la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo H para $\rho_3 = \infty$, los planos de S , para valores iguales de h_1 y ρ_1 , de abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, de ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ y también los perfiles de variación de las magnitudes indicadas se puede, con frecuencia, mediante el estudio de todos estos documentos, formular fundadas hipótesis sobre la variación cualitativa de la profundidad del horizonte de apoyo y de la resistividad del nivel conductor, aún en el caso de que en el corte, en ciertos puntos de SEV sea aplicable el principio de equivalencia. A veces estos planos y perfiles permiten dar valores aproximados y la variación cuantitativa del parámetro ρ_2 dentro de los límites del área estudiada, sobre todo si existen algunos sondeos mecánicos.

El estudio indicado tiene un mayor valor en el proceso de interpretación de las curvas de SEV de cuatro o más capas, que en el de las curvas de dos y tres capas de tipo H.

Fig. 100.—
Disminución de h_2 y ρ_2 en el punto de SEV II para abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ constante, S creciente y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ decreciente en la curva II del SEV.



18. Resistividad media longitudinal (ρ_l) del corte y variación de la misma en función de los parámetros de las capas, para $\rho_3 = \infty$

La resistividad media longitudinal ρ_l del corte de tres capas, para $\rho_3 = \infty$, se puede hallar, como sabemos, por la proporción (4)

$$\rho_l = (h_1 + h_2) / (h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2) = (h_1 + h_2) / S$$

siendo h_1, h_2, ρ_1, ρ_2 , los espesores y resistividades de la primera y segunda capas del corte y S la conductancia longitudinal total de ambas.

De esta expresión se deduce que

$$h_1 + h_2 = H = \rho_l \cdot S.$$

Conociendo la resistividad longitudinal del corte, fácilmente se halla la profundidad del horizonte de apoyo si la resistividad verdadera de éste es infinitamente grande. Por ello, la determinación de ρ_l juega un papel importante en la interpretación de las curvas de SEV.

Veamos cómo varía la magnitud ρ_l en función de las relaciones de los parámetros del corte μ_1 y ν_1 .

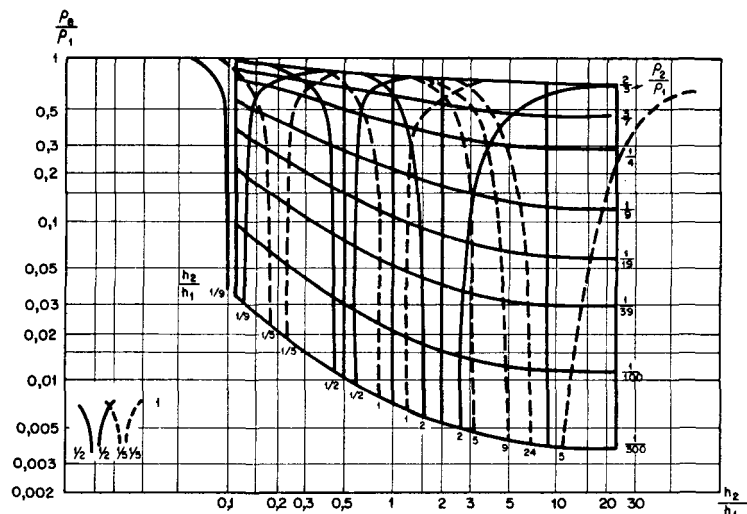
Expresando ρ_l en función de ρ_1 tenemos

$$\rho_l / \rho_1 = (1 + \nu_1) / (1 + \nu_1 / \mu_1) \tag{26}$$

En las figuras 101 y 102 se muestran, calculadas mediante esta fórmula, unas gráficas que expresan la variación de ρ_l / ρ_1 en función de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . En ellas están marcadas las zonas dentro de cuyos límites la variación de h_2/h_1 o ρ_2/ρ_1 provocan variaciones en los valores de ρ_l / ρ_1 , que no sobrepasan $\pm 10\%$ de su valor inicial para h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 dados.

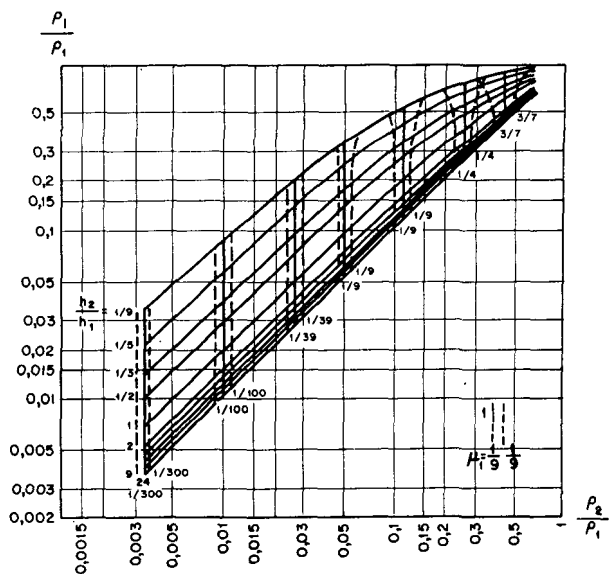
Fig. 101.—Curvas de SEV de tipo $H, \rho_3 = \infty$.

Variación de $\frac{\rho_l}{\rho_1}$ en función de $\frac{h_2}{h_1}$
 1.—Zona de la variación admisible de h_2 , para la que ρ_l no varía más de $\pm 10\%$ de su valor inicial.



Veamos el caso en que sólo varía en el corte h_2/h_1 . En la figura 101 se aprecia que ρ_l disminuye al crecer h_2/h_1 , aumentando el grado de esta disminución al descender el valor inicial de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . Para valores altos de h_2/h_1 ($h_2/h_1 \geq 9$) y ρ_2/ρ_1 cualquiera, el espesor h_2 puede crecer ilimitadamente y ρ_l/ρ_1 no disminuirá de modo importante en comparación con su valor para el corte dado inicialmente. Por consiguiente, el decrecimiento de h_2 , para estas condiciones, es admisible sólo hasta cierto límite.

Fig. 102.—Curvas de SEV de tipo H.
 $\rho_3 = \infty$.
 Variación de ρ_i/ρ_1 ,
 en función de
 ρ_2/ρ_1 .
 1.—Zona de
 variación
 admisible de ρ_2
 para la que ρ_i
 no varía más de
 $\pm 10\%$ de su valor
 inicial.

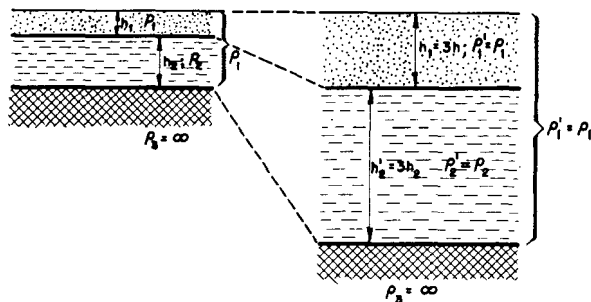


En la expresión (26) se ve que el crecimiento de h_2 produce en ρ_i/ρ_1 la misma influencia que el decrecimiento de h_1 . Esto permite extender todas las conclusiones respecto a la variación de ρ_i/ρ_1 en función de h_2 creciente, al caso de h_1 decreciente.

En la tabla 17 se presentan, como consecuencia del estudio de las gráficas de la figura 101 una serie de valores de h_1 y h_2 , para los que ρ_i/ρ_1 no sufre variaciones mayores de $\pm 10\%$ de sus valores iniciales. La tabla 17 demuestra que, por ejemplo, para valores iniciales de los parámetros h_2/h_1 de $1/2$ a 1 y ρ_2/ρ_1 $1/39$ a $1/9$, la variación de h_1 y h_2 puede oscilar sólo entre $\pm 20\% \div 30\%$ para que la variación de ρ_2/ρ_1 no rebase de los límites exigidos.

En la expresión (26) se observa que, al variar h_1 y h_2 el mismo número de veces ($\nu_1 = h_2/h_1 = \text{constante}$) y permanecer constantes los demás parámetros, ρ_i permanece constante. Por tanto, al variar bruscamente la profundidad del horizonte de apoyo, a causa de la misma variación de h_1 y h_2 (fig. 103) y permaneciendo constante la resistividad de la capa intermedia, la resistividad longitudinal ρ_i del corte no varía.

Fig. 103.—
 Constancia de la
 resistividad
 longitudinal ρ_i en
 el corte de tres
 capas de tipo H
 (y A) para igual
 variación de h_1 y
 h_2 permaneciendo
 ρ_1 y ρ_2 constantes.



La variación de ρ_2 influye en mucho mayor grado en ρ_i que la de h_2 (comparar figs. 101 y 102). Al crecer ρ_2 la resistividad longitudinal crece. La intensidad de crecimiento aumenta,

TABLA 17

VARIACIONES ADMISIBLES DE h_1 O h_2 EN CORTES DE TIPO H ($\rho_3 = \infty$) QUE LIMITAN LAS VARIACIONES DE ρ_2/ρ_1 HASTA $\pm 10\%$ DE SU VALOR INICIAL

Parámetros iniciales del corte		Variaciones admisibles de h_1 o h_2	
$v_1 = h_2/h_1$	$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	h_1 decreciente o h_2 creciente n.º de veces	h_1 creciente o h_2 decreciente n.º de veces
24	1/300	ilimitadamente	3,4
	1/100	ilimitadamente	3,4
	1/39	ilimitadamente	3,6
	1/9	ilimitadamente	3,7
	2/3	ilimitadamente	10,0
9	1/300	ilimitadamente	1,6
	1/100	ilimitadamente	1,8
	1/39	ilimitadamente	1,9
	1/9	ilimitadamente	2,1
	2/3	ilimitadamente	5,5
5	1/300	2,2	1,5
	1/100	2,5	1,6
	1/39	3	1,6
	1/9	4	1,7
	2/3	15	3,6
2	1/300	1,3	1,2
	1/100	1,3	1,3
	1/39	1,3	1,4
	1/9	1,6	1,4
	2/3	9	2,8
1	1/300	1,2	1,2
	1/100	1,2	1,2
	1/39	1,2	1,2
	1/9	1,3	1,2
	2/3	3,2	2,5
1/2	1/300	1,2	1,1
	1/100	1,2	1,2
	1/39	1,2	1,2
	1/9	1,3	1,2
	2/3	3,2	2,8

como vemos, con el aumento de los valores iniciales de h_2/h_1 y la disminución de ρ_2/ρ_1 . Para valores de h_2/h_1 , considerables ($h_2/h_1 \geq 9$) y ρ_2/ρ_1 relativamente pequeño ($\rho_2/\rho_1 \geq 1/9$), ρ_1 crece de forma casi directamente proporcional al crecimiento de ρ_2 . Los límites admisibles del cambio de ρ_2/ρ_1 para el que ρ_1/ρ_1 varía menos de $\pm 10\%$ de su valor, para los parámetros dados inicialmente, no son muy grandes (tabla 18).

Por lo que respecta a la influencia de la variación de ρ_1 en el crecimiento de ρ_2 , el examen de esta cuestión conduce a los siguientes resultados:

- 1) ρ_1 crece al crecer ρ_1 .

- 2) ρ_1 crece entre amplios límites, sin que resulte de ello prácticamente ninguna influencia en ρ_2 , para el caso de un valor inicial de ρ_2/ρ_1 , relativamente pequeño. Cuanto mayor sea este último, tanto menor puede ser h_2/h_1 . Así para un valor inicial de $\rho_2/\rho_1 = 1/39$, el crecimiento de ρ_1 en cualquier número de veces no produce aumento de ρ_2 , incluso para una relación tan pequeña como $h_2/h_1 = 1/2$. Para $\rho_2/\rho_1 = 1/19$, el valor mínimo extremo de h_2/h_1 para el que no se observa variación en ρ_2 al crecer ρ_1 es $h_2/h_1 = 3$. Para $\rho_2/\rho_1 = 1/9$, será igual a 5, etc.
- 3) ρ_1 puede decrecer sólo entre límites muy estrechos para no producir decrecimiento visible de ρ_2 .

En la tabla 18 se presentan las variaciones admisibles de ρ_1 y ρ_2 para las que ρ_1 no varía en más de $\pm 10\%$, de su valor inicial. En ella se observa que, sobre todo, influye poco en ρ_2 la variación de ρ_1 , en especial si ρ_2 es muy grande.

TABLA 18

VARIACIONES ADMISIBLES DE ρ_1 Y ρ_2 EN EL CORTE DE TIPO H ($\rho_3 = \infty$) QUE LIMITAN LAS VARIACIONES DE ρ_2 HASTA $\pm 10\%$ DE SU VALOR INICIAL

Parámetros iniciales del corte		Variaciones admisibles de ρ_1		Variaciones admisibles de ρ_2	
$\nu_1 = h_2/h_1$	$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Decrecimiento de ρ_1 , n.º de veces	Crecimiento de ρ_1 , n.º de veces	Decrecimiento de ρ_2 , n.º de veces	Crecimiento de ρ_2 , n.º de veces
24	1/39	~ 100	ilimitado	1,07	1,09
	1/9	~ 25	ilimitado	1,10	1,10
	2/3	~ 5	ilimitado	1,10	1,11
9	1/39	~ 35	ilimitado	1,07	1,09
	1/9	~ 10	ilimitado	1,10	1,10
	2/3	~ 2,5	ilimitado	1,10	1,11
5	1/39	~ 20	ilimitado	1,07	1,09
	1/9	~ 6	ilimitado	1,10	1,10
	2/3	~ 2	5	1,12	1,15
2	1/39	~ 5	ilimitado	1,07	1,1
	1/9	~ 2,8	ilimitado	1,10	1,09
	2/3	~ 1,5	1,5	1,12	1,15
1	1/39	~ 5	ilimitado	1,08	1,09
	1/9	~ 2,2	11	1,10	1,10
	2/3	~ 1,25	1,30	1,20	1,16
1/2	1/39	~ 2,5	ilimitado	1,09	1,13
	1/9	~ 1,5	2,2	1,10	1,15
	2/3	~ 1,1	1,25	1,20	1,20

La resistividad longitudinal, como se ve en la expresión (26) varía al máximo si simultáneamente varían en un mismo sentido h_1 y ρ_1 o en sentido opuesto h_2 y ρ_2 .

Esta expresión demuestra que si, permaneciendo constantes los parámetros h_1 y h_2 (o su relación ν_1), se varían del mismo modo ρ_1 y ρ_2 (μ_1 permanece constante), entonces varía en la misma proporción ρ_i .

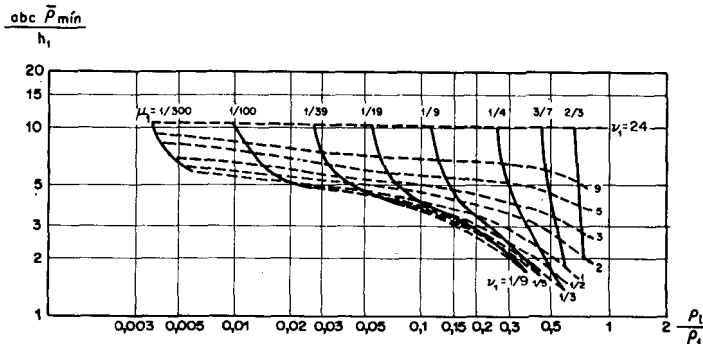
Para igual variación de h_1 y ρ_1 predomina en ρ_i la variación de h_{1i} , en caso de ρ_2/ρ_1 inicialmente pequeño ($\rho_2/\rho_1 \leq 1/4$) y la de ρ_{1i} , en caso de ρ_2/ρ_1 relativamente grande.

Veamos ahora la relación entre el valor de ρ_i y la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV de tipo H.

Las curvas calculadas de SEV demuestran que los puntos $\bar{\rho}_{min}$ de las mismas están normalmente en el impreso de SEV encima de la recta $\bar{\rho} = \rho_i$. En las figuras 104 y 105 se tienen unos gráficos que reflejan la variación de las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ en función de ρ_i para diversos valores de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 .

Como se ve (fig. 104), al crecer ρ_i/ρ_1 , para h_2/h_1 constante, la relación abc. $\bar{\rho}_{min}/h_1$ decrece, y tanto más intensamente cuanto menor es h_2/h_1 y mayor ρ_2/ρ_1 . Si ρ_2/ρ_1 permanece constante y h_2/h_1 varía, entonces para variaciones pequeñas (crecientes) de ρ_i/ρ_1 , abc. $\bar{\rho}_{min}/h_1$ decrece bruscamente. Ello va unido al decrecimiento de h_2/h_1 , que, además, suscita en el caso indicado un aumento de ρ_i/ρ_1 .

Fig. 104.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de abc. $\bar{\rho}_{min}/h_1$ en función de ρ_i/ρ_1 .



Al crecer ρ_i la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ crece bastante intensamente, sobre todo para ρ_2/ρ_1 constante y h_2/h_1 variable (fig. 105). En la tabla 19 se presentan estas magnitudes mínimas extremas de ρ_2/ρ_1 a partir de las cuales, para diversos valores constantes de h_2/h_1 , se puede admitir que la variación de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ es directamente proporcional a la variación de ρ_i/ρ_1 .

Fig. 105.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ en función de ρ_i/ρ_1 .

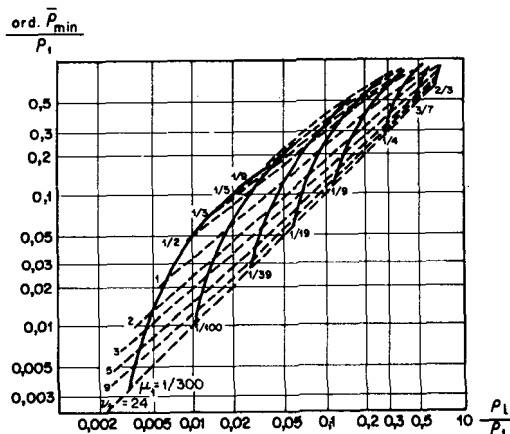


TABLA 19

ρ_2/ρ_1 MINIMO A PARTIR DEL CUAL LA VARIACION DE ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ ESTA PRACTICAMENTE EN PROPORCION DIRECTA CON LA VARIACION DE ρ_1/ρ_1

h_2/h_1	ρ_2/ρ_1
24	ρ_2/ρ_1 cualquiera
9	1/39
5	1/39
3	1/39

Así pues, si se sabe que en el área de estudio h_2/h_1 varía, por ejemplo, entre 24 y 5 y ρ_2/ρ_1 , entre 1/39 y 2/3, se puede estimar con toda libertad que ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ varía en proporción directa a ρ_1/ρ_1 . Esto permite, con suficiente exactitud, estimar el valor de ρ_1 para los diferentes puntos de la superficie examinada, mediante curvas de SEV, si se conoce en alguno de ellos.

Para evidenciar con mayor claridad en qué medida la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, que es el índice más claro de la variación de ρ_{II} , se diferencia de esta magnitud para diversos parámetros del corte, se han representado en las figuras 106 y 107, curvas que dan la variación de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_{II}$ en función de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 ($\rho_3 = \infty$).

Fig. 106.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 = \infty$. Variación de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ en función de h_2/h_1 .

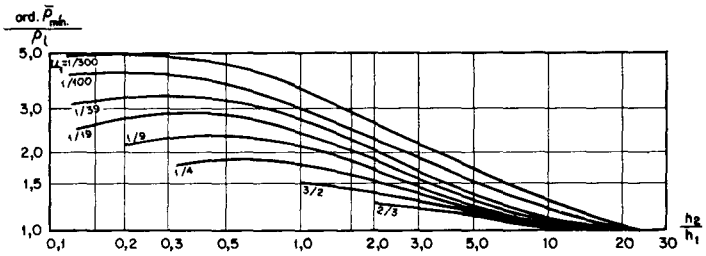
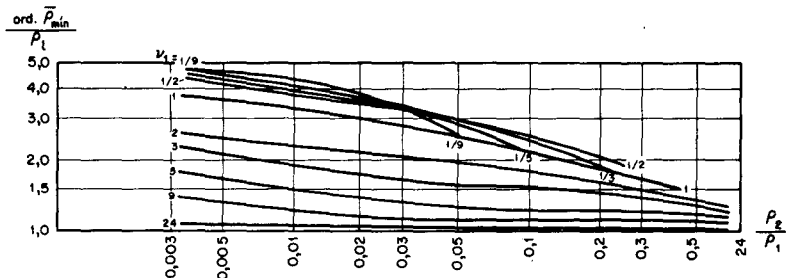


Fig. 107.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 = \infty$. Variación de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_{II}$ en función de ρ_2/ρ_1 .

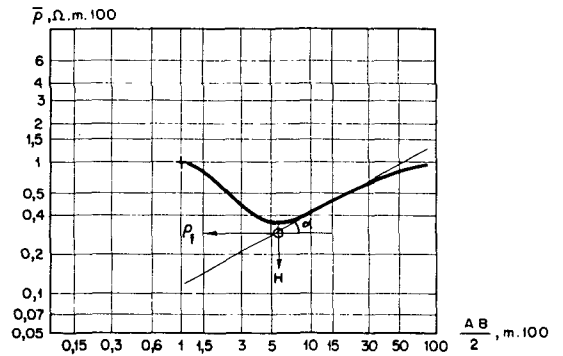


19. Resistividad media longitudinal ρ_I del corte y variación de la misma en función de los parámetros de las capas para $\rho_3 \neq \infty$

Si la resistividad del horizonte de apoyo en el corte eléctrico no es infinitamente grande, entonces la rama derecha de la curva de SEV ya no estará inclinada respecto al eje de abscisas un ángulo de 45° . El ángulo de inclinación (que denominaremos α) de la rama derecha, cuya parte final tiende al valor $\bar{\rho} = \rho_n$ (siendo ρ_n la resistividad del horizonte de apoyo) es menor de 45° y viene determinado por los parámetros de las capas del corte. Para curvas de SEV pertenecientes, por ejemplo, al corte eléctrico de tres curvas de tipo H, el ángulo

α depende no sólo de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , sino también de ρ_3/ρ_1 y ρ_3/ρ_2 . Convenimos en llamar, de modo análogo, resistividad longitudinal del corte eléctrico, para $\rho_3 \neq \infty$, a la ordenada del punto de intersección de la línea H con la prolongación de la tangente a la rama derecha ascendente de la gráfica de SEV (fig. 108). Designemos a esta resistividad, para distinguirla de ρ_l (para $\rho_n = \infty$) por ρ_r .

Fig. 108.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 \neq \infty$. Cálculo gráfico de la resistividad media longitudinal ρ_r .

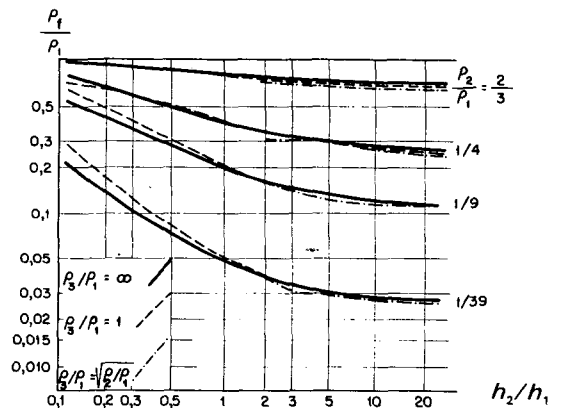


19.1. Dependencia de ρ_r de h_2/h_1 , ρ_2 y ρ_3

Utilizando las curvas calculadas de tres capas de tipo H, para $\rho_3/\rho_1 \neq \infty$, hallamos la relación gráfica entre ρ_r/ρ_l y los parámetros del corte, h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 de modo análogo a la existente entre ρ_l/ρ_1 y los correspondientes parámetros para $\rho_3 = \infty$.

Los gráficos de las figuras 109 y 110 demuestran que ρ_r varía según una ley análoga a la de ρ_l . Sin embargo, el valor de ρ_r se desvía algo del correspondiente de ρ_l . La máxima desviación, de signo positivo, se observa para valores de h_2/h_1 relativamente pequeños ($1/9 - 1/5$) y de ρ_2/ρ_1 ($1/39 - 1/9$). Para valores relativamente grandes de h_2/h_1 ($h_2/h_1 \geq 2$) y $\rho_2/\rho_1 > 1/10$, el valor de ρ_r resulta tanto menor que ρ_l , y cuanto más difiera ρ_3/ρ_1 de ∞ . Esta disminución llega en total al 10—15% del valor de ρ_l .

Fig. 109.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de ρ_r/ρ_l en función de h_2/h_1 .



Comparando los gráficos que representan la variación de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ en función de ρ_l (fig. 105) y de ρ_r (fig. 111), se llega a la siguiente conclusión: existe una ley común de

Fig. 110.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de ρ_f/ρ_1 en función de ρ_2/ρ_1 .

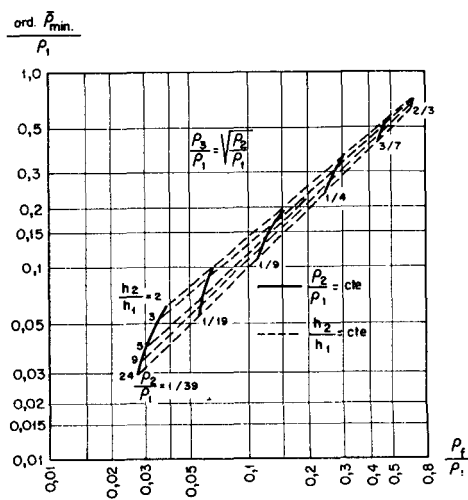
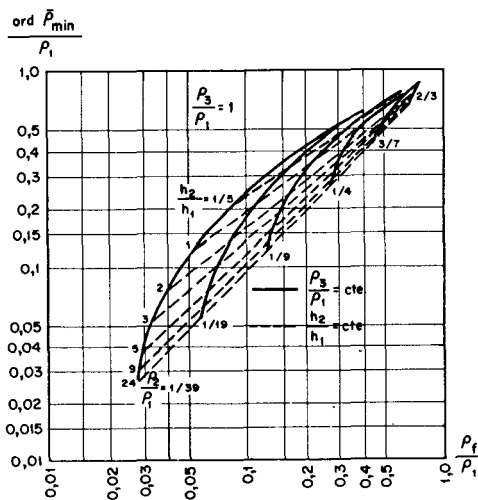
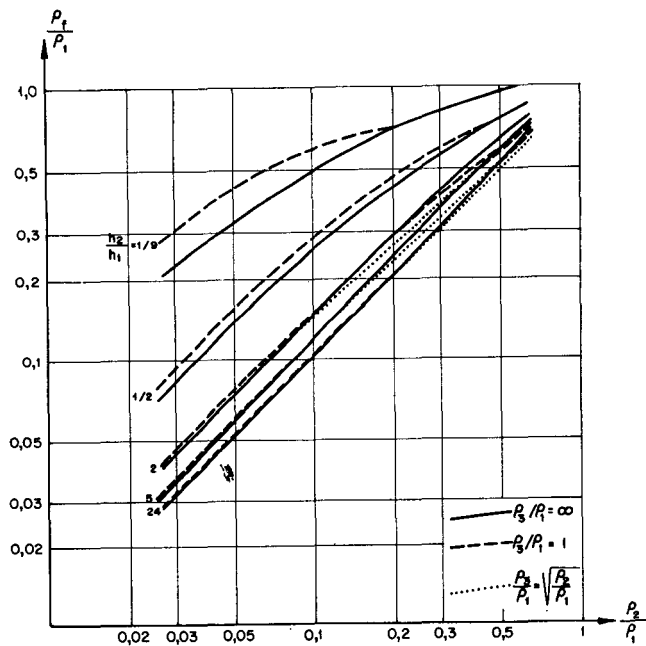
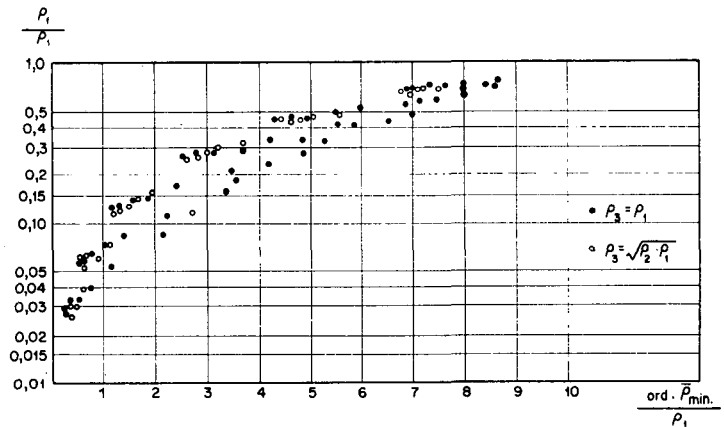


Fig. 111.—Curvas de SEV de tipo H. Variación de ord. \bar{p}_{min}/ρ_1 en función de ρ_f/ρ_1 .

variación de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Sin embargo, la zona de disposición de los puntos que caracterizan la dependencia de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ respecto a ρ_r , se hace más estrecha al disminuir ρ_3/ρ_1 . Ello va ligado, según parece, a la reducción del intervalo de variación de ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ al disminuir ρ_3 . No obstante, la dispersión de los puntos que expresan la dependencia de ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ de ρ_r/ρ_1 , para los diversos parámetros del corte es tan grande (fig. 112) que no es posible trazar una curva típica pasando por ellos que caracterice con suficiente exactitud la dependencia indicada.

Fig. 112.—Curvas de SEV de tipo H
de SEV de tipo H
 $\rho_3 \neq \infty$.
Relación entre
 ρ_r/ρ_1 y ord.
 $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$.



19.2. Variación del ángulo de inclinación α de la rama ascendente de la curva de SEV en función de la de los parámetros de las capas del corte

Como ha puesto de manifiesto K. A. Shajnes, tiene gran interés práctico en la interpretación de las curvas de SEV, para el caso de $\rho_3 \neq \infty$, la utilización de la dependencia de ρ_r de α .

Ante todo, veamos con un ejemplo de las curvas calculadas de SEV de tres capas, el carácter de la relación entre α —ángulo de inclinación con el eje de abcisas de la rama ascendente de la curva de SEV— y los parámetros de las capas del corte.

Los gráficos de la figura 113 ponen de manifiesto que el ángulo α crece fuertemente al crecer h_2/h_1 , para valores iniciales de h_2/h_1 hasta 2 y 4 aproximadamente. Al seguir aumentando h_2/h_1 con los demás parámetros constantes, α queda prácticamente inalterable (tabla 20).

Como se ve en dicha tabla, los valores de h_2/h_1 aumentan al disminuir ρ_3/ρ_1 .

El ángulo α , para las restantes relaciones de los parámetros del corte constantes, disminuye al aumentar ρ_2/ρ_1 . El grado de este decrecimiento aumenta algo (fig. 114) para valores de h_2/h_1 inicialmente pequeños.

Al aumentar ρ_3/ρ_1 , permaneciendo h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 constantes, el ángulo α crece. La intensidad de este crecimiento aumenta con el de los valores iniciales de ρ_2/ρ_1 (fig. 115) y la disminución de h_2/h_1 , hasta cierto límite.

TABLA 20

VALORES MINIMOS DE h_2/h_1 , A PARTIR DE LOS CUALES PRACTICAMENTE NO INFLUYE EL CRECIMIENTO DE h_2/h_1 , EN EL ANGULO DE INCLINACION DE LA RAMA FINAL DE LA CURVA DE SEV ($\rho_3 \neq \infty$)

Valores iniciales de ρ_2/ρ_1	Valores mínimos iniciales de h_2/h_1 , para los que su crecimiento ulterior no provoca aumento de α	
	Para $\rho_3/\rho_1 = 1$	Para $\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
1/39	2	5
1/19	2	5
1/9	3	5
1/4	3	5

Fig. 113.—Curvas de SEV de tipo H $\rho_3 \neq \infty$. Variación del ángulo α en función de h_2/h_1 (según K. A. Shajnes).

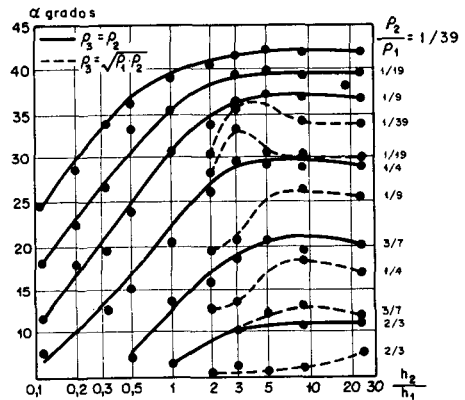
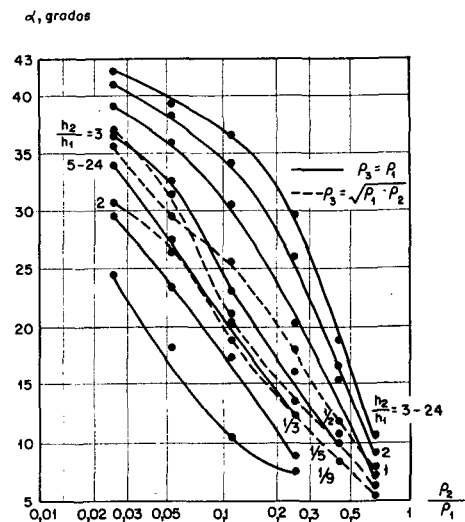


Fig. 114.—Curvas de SEV de tipo H $\rho_3 \neq \infty$. Variación del ángulo α en función de ρ_2/ρ_1 (según K. A. Shajnes).



Del examen de la dependencia entre la variación del ángulo α y los parámetros del corte se saca la conclusión de que la misma depende en mayor grado de los parámetros ρ_2 y ρ_3 , sobre todo para $h_2/h_1 \geq 2$. La variación de estos parámetros, como se puede ver, influye en α en sentido opuesto. El grado de influencia de ambos para valores iniciales de ρ_2/ρ_1 ,

relativamente pequeños ($\rho_2/\rho_1 \leq 1/9$) es casi igual. En caso de ρ_2/ρ_1 relativamente grande, la influencia predominante en α resulta de la variación de ρ_3 .

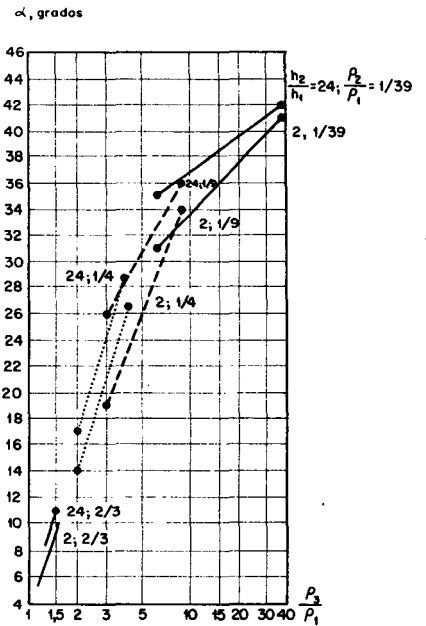


Fig. 115.—Curvas de SEV de tipo H $\rho_3 \neq \infty$. Variación del ángulo α en función de ρ_3/ρ_1 .

19.3. Relación entre la variación de ρ_r y α

El crecimiento del ángulo α , para ρ_1 , h_1 y ρ_3 constantes, va ligado al aumento de h_2 y la disminución de ρ_2 . Con ello va también ligado la disminución de ρ_r . Es, por tanto, lógico esperar que al aumentar α se produzca una disminución de ρ_r (fig. 116).

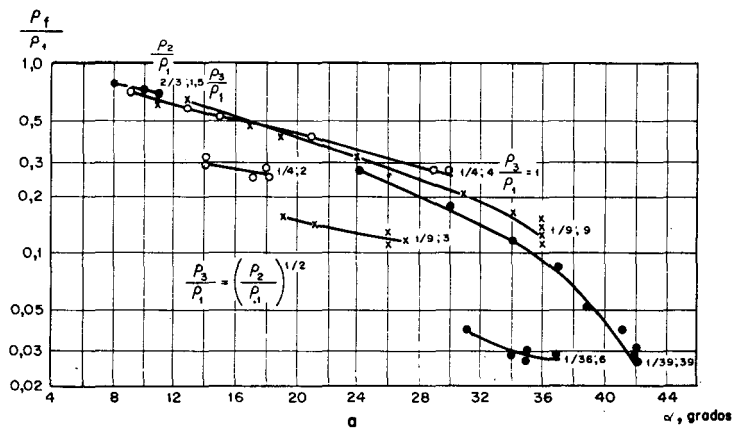
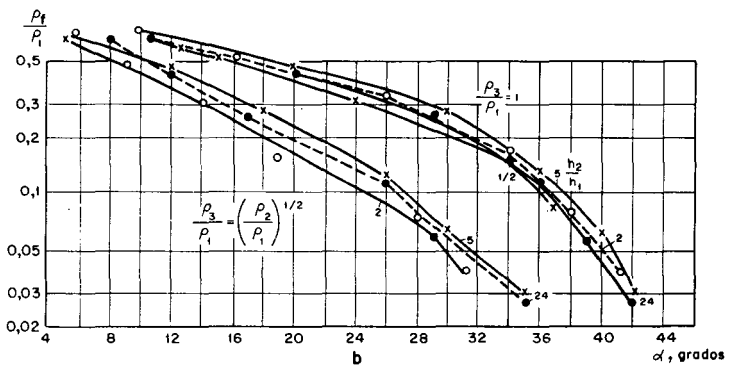


Fig. 116.—Curvas de SEV de tipo H $\rho_3 \neq \infty$. Relación entre ρ_r/ρ_1 y α para ν_1 y μ_1 variables. El crecimiento de α ligado: a.—con el crecimiento de h_2 ; b.—con la disminución de ρ_2 .

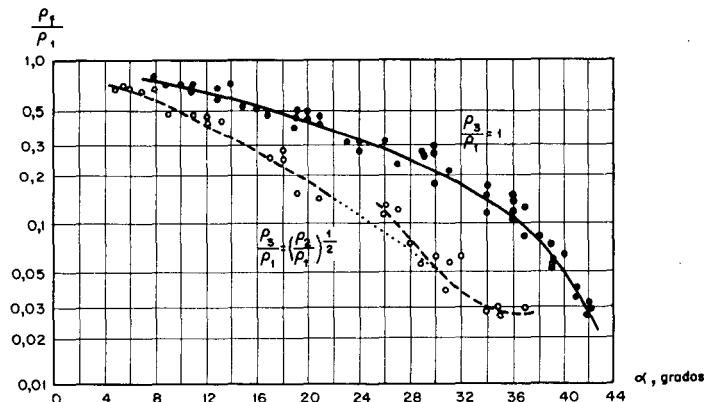


Si ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 permanecen constantes, entonces el ángulo α crece solamente en relación con el crecimiento de h_2/h_1 . Al mismo tiempo, α tiende al valor determinado por los parámetros ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 . En este caso, como se ve fácilmente, ρ_i/ρ_1 tiende a ρ_2/ρ_1 . Por consiguiente, para la variación considerada de α , la parte final de la gráfica que caracteriza la variación de ρ_i/ρ_1 en función de α , cuando este ángulo llega al valor límite, se transforma en un segmento de recta paralelo al eje de abscisas. En caso de $\rho_3 = \infty$, es decir, cuando $\alpha = 45^\circ$, para cualquier valor de ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 , la dependencia de ρ_i de α , se expresa evidentemente por una recta paralela al eje de ordenadas.

Supongamos ahora que en el corte permanecen constantes h_2/h_1 y ρ_3/ρ_1 . Entonces α sólo puede crecer al disminuir ρ_2/ρ_1 y, en el límite, este ángulo de inclinación de la curva de SEV tiende a 45° . Al disminuir ρ_2/ρ_1 , decrece ρ_i/ρ_1 . Por consiguiente, al crecer α , en caso de h_2/h_1 y ρ_3/ρ_1 constantes, el valor de ρ_i/ρ_1 decrece y tiende a ρ_i/ρ_1 para h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 dados.

Si en el corte son constantes h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 y el ángulo de inclinación de la curva de SEV crece sólo en función del aumento de ρ_3/ρ_1 , entonces ρ_i/ρ_1 no varía apenas al crecer α (fig. 117).

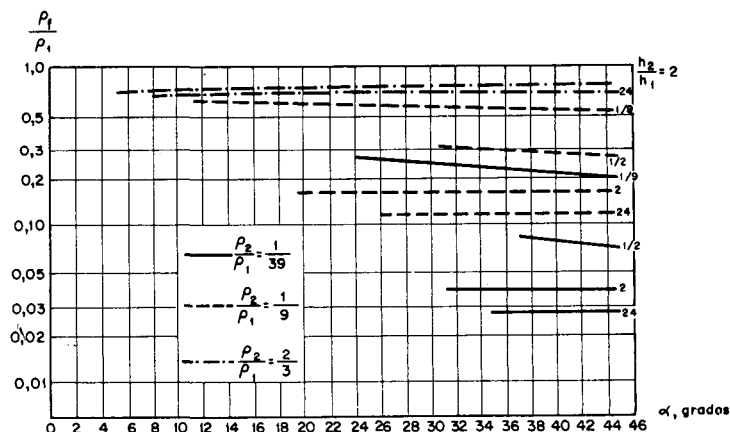
Fig. 117.—
Curvas
de SEV de tipo H.
 $\rho_3 \neq \infty$. Relación
entre ρ_i/ρ_1 y
 α para ρ_3/ρ_1
variable (α
creciente junto
con ρ_3 creciente).



Si ρ_3/ρ_1 baja, lo que influye escasamente en ρ_i/ρ_1 , se produce un descenso de α que arrastra tras sí el traslado de la curva que relaciona ρ_i/ρ_1 con α hacia abajo. De aquí se deduce, que para un mismo valor de α , el valor de ρ_i/ρ_1 decrece al hacerlo ρ_3/ρ_1 . Esto es lógico: si el ángulo α de inclinación de la rama derecha de la curva de SEV de tipo H permanece constante al decrecer ρ_3/ρ_1 , entonces en el corte crece h_2/h_1 o decrece ρ_2 (puede ocurrir simultáneamente ambos casos o uno de ellos), lo que lleva consigo el aumento de ρ_i/ρ_1 (figuras 113 y 114).

Llevemos todos los puntos que expresan la relación entre ρ_i/ρ_1 y α , para h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 variables, a un plano (fig. 118). Teniendo presente la relativamente pequeña dispersión de estos grupos de puntos y agrupando los valores $\rho_3/\rho_1 = 1$ y $\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$ se puede construir una curva

Fig. 118.—Curvas de SEV de tipo H
 $\rho_3 \neq \infty$.
 Relación entre ρ_r/ρ_1 y α para variación de h_2/h_1 entre 1/9 y 24 y variación de ρ_2/ρ_1 entre 1/39 y 2/3 (según K. A. Shajnes).



promedio para cada uno de estos grupos. Las curvas obtenidas caracterizan con un cierto error el valor de ρ_r/ρ_1 en función de α , para los valores de ρ_3/ρ_1 indicados y una amplia gama de variación de h_2/h_1 (de 1/9 a 24, es decir, en más de 200 veces) y ρ_2/ρ_1 (de 1/39 a 2/3, en 26 veces).

Fácilmente se calcula que, por ejemplo, para la primera de estas curvas ($\rho_3 = \rho_1$) se puede obtener ρ_r/ρ_1 para un valor de α dado, con error relativo de $\pm 5\%$ a $\pm 25\%$ respecto al verdadero valor de ρ_r/ρ_1 . Para éste, el error mínimo se produce para un ángulo $\alpha \leq 25^\circ$.

En la práctica, el límite de variación de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 no puede alcanzar los grandes valores para los que ha sido hecha la curva de dependencia indicada. Por consiguiente, y con mucha probabilidad, el error máximo en la determinación de ρ_r/ρ_1 será en la práctica bastante menor de $\pm 25\%$.

Por consiguiente, la variación de los parámetros h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , para ρ_3/ρ_1 constante, conduce, con cierta aproximación, a una relación simple entre ρ_r/ρ_1 y α , es decir, a una curva con un determinado error que expresa esta dependencia. La variación de ρ_3/ρ_1 provoca el desplazamiento de la curva (al disminuir ρ_3/ρ_1 se produce un desplazamiento de la curva hacia abajo, en la misma dirección de la disminución de ρ_r/ρ_1) tanto mayor cuanto lo sea esta variación.

20. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo H

En la práctica es raro encontrar que los resultados de la investigación eléctrica se representen por curvas de SEV de uno solo de los tipos. Normalmente, en la exploración se presentan gráficas de SEV de aspecto muy variable. El caso de que la exploración eléctrica conduce a un corte de tres capas en toda la superficie examinada, también es raro. Sin embargo, para la interpretación de curvas de SEV que indican un corte complejo de cuatro o más capas, a menudo se puede referir el mismo al de tres capas. Por ello es oportuno estudiar detalladamente la interpretación de curvas de SEV de tres capas.

Para la interpretación cualitativa se hacen habitualmente planos de tipos de curvas de SEV, de valores h_1 y ρ_1 , de abscisas y ordenadas de puntos extremales de las curvas de SEV, de isorresistividades, de igual conductancia longitudinal

S , de ángulo α , de valor L . También se construyen perfiles auxiliares con estas magnitudes y cortes de resistividades aparentes.

No siempre es obligatorio hacer todos estos documentos. En cada caso concreto se utilizan los mapas y perfiles cualitativos que, con la mayor claridad, pueden dar una idea general de las particularidades de la estructura geológica del terreno estudiado y de un modo u otro solucionan el problema fundamental de la interpretación cualitativa: valorar en lo posible las resistividades del corte y la ley de variación de las mismas dentro de los límites de la superficie investigada.

20.1. Planos de tipos de curvas de SEV

Es difícil dar normas concretas para la confección de estos planos. La variación de la forma de las curvas de SEV se supone va ligada a las variaciones del corte geoelectrico, zonas tectónicas, relieve del terreno y otras causas. Cada intérprete aborda según su criterio la confección de planos con los tipos de curvas de SEV, subrayando en ellos precisamente los rasgos en la variación de las curvas que ayudan más en la interpretación de los resultados de la exploración eléctrica. Nos limitaremos, por tanto, a dar tan sólo algunas indicaciones de carácter general.

Suponemos que sólo se presentan en la zona de estudio curvas de SEV de tres capas de tipo H y que las mismas ponen de manifiesto un horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande.

Las curvas de SEV, en el caso examinado, se pueden subdividir, en primer lugar, en los casos $\alpha = 45^\circ$ y $\alpha \neq 45^\circ$. Luego, dentro de los límites de estos grupos, se subrayan las curvas de SEV por la forma de los mínimos de $\bar{\rho}$: mínimos claros y bien perfilados, mínimos con pendientes suaves, más expresados, etc. En un grupo separado se disponen las curvas de SEV cuya marcha aparece perturbada por cualquier alteración.

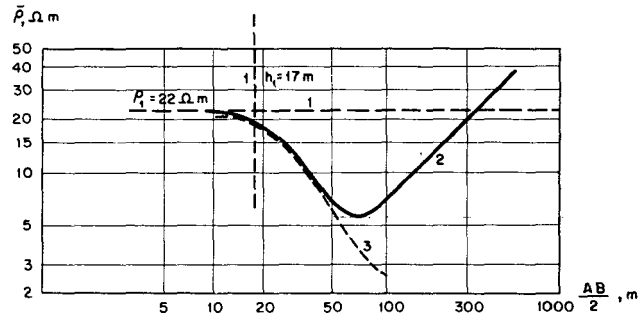
El plano con los diversos tipos de curvas, pone de manifiesto las zonas con curvas de análogo aspecto y ayudan en el análisis e interpretación del corte eléctrico correspondiente. A veces, este plano tiene en sí un valor propio para la interpretación de la tectónica del área de estudio o como complemento de los mapas geológicos.

Los planos con los tipos de curvas de SEV habitualmente se presentan tomando como base las cartas geológicas de la zona de estudio, con indicación del azimut del dispositivo eléctrico y se estudian siempre en estrecha relación con otras cartas de interpretación cualitativa y cuantitativa de las curvas. Posteriormente, en el proceso de la interpretación cuantitativa se someten los planos de tipos de curvas de SEV a una más precisa y profunda interpretación.

20.2. Planos de valores de h_1 y ρ_1

Anteriormente se ha demostrado que la variación del espesor y resistividad de la capa superior del corte eléctrico (h_1 y ρ_1) influyen en algunos casos de modo manifiesto en la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV. Por ello es de interés el plano de las variaciones de esos parámetros. Estos valores, para la interpretación cualitativa, se calculan con ayuda del ábaco de dos capas de las curvas de SEV. Un ejemplo de este cálculo se presenta en la figura 119.

Fig. 119.—Cálculo de h_1 y ρ_1 en las curvas de SEV de tipo H, con ayuda del ábaco de dos capas.
 1.—Ejes de coordenadas del ábaco de dos capas;
 2.—Curva de SEV que hay que interpretar;
 3.—Curva $\mu_1 = 1/9$ del ábaco de dos capas.



Se confeccionan planos de igual valor de h_1 y ρ_1 . Con frecuencia, sin embargo, se subrayan en los planos únicamente las zonas en que los valores de h_1 y ρ_1 varían entre ciertos límites. Se suelen incluir también perfiles de variación de h_1 y ρ_1 .

20.3. Planos de valores de abcisas y ordenadas de los puntos $\bar{\rho}_{min}$ de las curvas de SEV

Estos valores se obtienen directamente de las curvas de SEV. Se hacen separadamente planos y perfiles de su variación.

Las zonas de subida de la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ pueden estar influidas por el crecimiento de h_1 , ρ_1 , h_2 y disminución de ρ_2 y ρ_3 . El análisis conjunto de los planos de abcisas y ordenadas de los puntos $\bar{\rho}_{min}$ y de variación de h_1 y ρ_1 junto con los de tipo de curvas de SEV, ayuda con frecuencia, aunque sea de modo aproximado, a aclarar cuáles sean las causas principales de la variación de la posición del mínimo en las curvas de SEV.

Utilizando en el análisis cualitativo de las curvas calculadas de SEV los planos de S , se puede juzgar aún con mayor certeza sobre la variación relativa de los parámetros de la capa conductora.

20.4. Planos S

Si $\rho_3 = \infty$, el valor S se obtiene directamente de los impresos de las curvas de SEV. En caso de h_1 pequeño y ρ_1 grande en comparación con h_2 y ρ_2 (esto ocurre en los cortes de tipo H) la conductancia total viene determinada por la conductancia de la segunda capa ($S_2 = h_2/\rho_2$). Por tanto, si en la zona investigada el valor de ρ_2 permanece aproximadamente

constante, el plano S refleja la variación del espesor h_2 de la capa conductora y, por tanto, la profundidad del horizonte de apoyo. En dicha zona, por consiguiente, los valores altos de S corresponden a una mayor profundidad de aquél. De aquí se deduce que el plano S , en primera aproximación, puede reflejar cualitativamente el comportamiento de la superficie del horizonte de apoyo, en caso de que el mismo tenga resistividad infinita.

20.5. Análisis de las curvas de SEV

Analizando los planos S , junto con los otros planos citados de interpretación cualitativa, se pueden sacar conclusiones sobre los valores más probables de h_2 y ρ_2 . Veamos esta posibilidad con un ejemplo de comparación de dos curvas de SEV.

Supongamos que las curvas de SEV 1 y SEV 2, en los puntos 1 y 2 del terreno investigado, tienen el aspecto indicado en la figura 120. Calculamos en ellas los valores h_1 y ρ_1 , abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, S (tabla 21) y valoramos la variación de estas magnitudes al pasar del punto 1 al 2.

TABLA 21

COMPARACION DE LOS SEV SEÑALADOS EN LOS PUNTOS 1 Y 2

Puntos de SEV	h_1 (m)	ρ_1 (ohm.m)	abc. $\bar{\rho}_{min}$ (m)	ord. $\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)	S (mho)
1	100	100	480	14,9	38
2	40	100	240	7,9	38
variación del punto de SEV 2 respecto al 1	disminuye 2,5 veces	invariable	decrece 2 veces	decrece 1,88 veces	invariable

En el punto de SEV 1, $S_1=1$ y en el punto de SEV 2, $S_1=0,25$. La variación de S_1 no afecta prácticamente a la magnitud S . Por ello se puede afirmar que esta última sólo está relacionada con la variación de h_2 y ρ_2 .

La constancia de S puede mantenerse con tres posibles combinaciones de variaciones de h_2 y ρ_2 del punto de SEV 2 respecto al punto de SEV 1, como hemos visto anteriormente (tabla 16). Veamos la probabilidad de cada una de estas combinaciones en la variación observada de la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ en la curva de SEV 2.

- 1) Para h_2 y ρ_2 constantes, la disminución de h_1 puede producir la disminución de la abcisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$.

De aquí que la constancia de h_2 y ρ_2 del punto de SEV 2 respecto a estos parámetros en el punto 1 sea muy probable.

- 2) El crecimiento de h_2 y ρ_2 el mismo número de veces no es posible, porque para ello es necesario aumentar la abcisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$, y en el caso visto precisamente disminuyen.
- 3) Al decrecer h_2 y ρ_2 , la abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ decrece.

De aquí se deduce que en el punto de SEV 2 se puede esperar que los parámetros h_2 y ρ_2 permanezcan constantes o que decrezcan el mismo número de veces.

Si se conocen los parámetros h_2 y ρ_2 en el punto de SEV 1, entonces se pueden calcular de modo análogo dichos parámetros con cierto grado de exactitud en el punto de SEV 2. Supongamos que el corte eléctrico queda establecido en el punto de SEV 1 mediante la testificación de un sondeo mecánico o gracias a que las curvas de SEV permiten una interpretación clara y es el siguiente:

$$\begin{array}{ll} h_1 = 100 \text{ m} & \rho_1 = 100 \text{ ohm.m} \\ h_2 = 200 \text{ m} & \rho_2 = 5,3 \text{ ohm.m} \\ h_3 = \infty & \rho_3 = \infty \\ \mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1/19 & \nu_1 = h_2/h_1 = 2. \end{array}$$

Veamos en qué medida el decrecimiento de h_2 en 2,5 veces influye en la variación de las coordenadas del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV. Suponemos que en el punto de SEV 2 los parámetros h_2 y ρ_2 permanecen invariables. Entonces, el corte eléctrico en este caso vendrá dado por:

$$\begin{array}{ll} h_1 = 40 \text{ m} & \rho_1 = 100 \text{ ohm.m} \\ h_2 = 200 \text{ m} & \rho_2 = 5,3 \text{ ohm.m} \\ h_3 = \infty & \rho_3 = \infty \\ \mu_1 = 1/19 & \nu_1 = 5 \end{array}$$

Para hallar S y la abcisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV en este caso y compararlas con las mismas magnitudes de la curva de SEV 1, utilizamos los gráficos de las figuras 81 y 90, obteniendo los siguientes datos (tabla 22):

TABLA 22

CALCULO DE LA VARIACION DEL PUNTO $\bar{\rho}_{min}$ Y DEL VALOR DE S DE LA CURVA DE SEV 1 A LA CURVA 2, PARA h_2 Y ρ_2 CONSTANTES

Puntos de SEV	μ_1	ν_1	abc. $\bar{\rho}_{min}$	abc. $\bar{\rho}_{min}$	ord. $\bar{\rho}_{min}$	ord. $\bar{\rho}_{min}$	S/S_1	S (mho)
			h_1	(m)	ρ_1	(ohm.m)		
1	1/19	2	4,8	480	0,15	15	38	38
2	1/19	5	6	240	0,08	8	93	37

En la anterior tabla se observa que si se suponen en el punto de SEV 2, h_2 y ρ_2 invariables, resulta que la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ disminuye dos veces, la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, 1,88 veces, y S no varía prácticamente. De aquí se puede llegar, por tanto, a una conclusión simple: el desplazamiento del punto $\bar{\rho}_{min}$ en la curva de SEV 2 tan sólo provoca la disminución de h_1 ; los

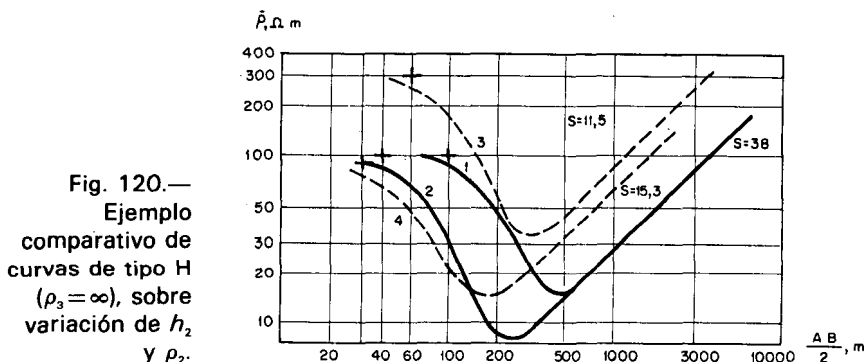
parámetros h_2 y ρ_2 quedan en este caso iguales que para el punto de SEV 1.

Veamos un ejemplo más complejo de comparación de curvas de SEV. En los puntos 3 y 4 del terreno investigado obtenemos las curvas de SEV 3 y SEV 4 (fig. 120). Calculemos para estas curvas los valores h_1 , ρ_1 , abscisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ S y llevémoslos a la tabla 23.

TABLA 23

COMPARACION DE LOS SEV INDICADOS EN LOS PUNTOS 3 Y 4

Puntos de SEV	h_1 (m)	ρ_1 (ohm.m)	abc. $\bar{\rho}_{min}$ (m)	ord. $\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)	S (mho)
3	60	300	320	33	11,5
4	30	90	160	14,7	15,3



En el punto 3, $S_1=0,2$ y en el punto 4, $S_1=0,3$. Por consiguiente, el valor de S_1 en el punto 4 aumenta respecto al correspondiente en el punto 3, en 0,1 mho. El valor S crece casi 4 mho. De aquí se deduce que el crecimiento de S en el punto 4 se relaciona principalmente con la variación de h_2 y ρ_2 .

Para aclarar cómo pueden variar h_2 y ρ_2 al pasar del punto 3 al 4, razonaremos del modo siguiente.

En el punto 4 crece S . Suponiendo $S \approx h_2/\rho_2$, es admisible pensar que este aumento puede ser provocado por las siguientes combinaciones en la variación de h_2 y ρ_2 :

Número	h_2	ρ_2
1, 2	permanece constante o decrece débilmente	disminuye
3, 4	crece	permanece constante o crece débilmente
5	crece	decrece

Examinemos las posibilidades de cada una de estas cinco combinaciones de las variaciones de marcha observadas en la curva de SEV 4.

- 1) Si h_2 permanece constante, entonces ρ_2 disminuye en 1,33 veces para satisfacer al S observado. Esto se puede admitir, porque la influencia total del decrecimiento de ρ_1 y ρ_2 en conjunto puede provocar en la indicada curva de SEV 4 el descenso de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Sin embargo, el decrecimiento de ρ_2 no puede conducir al de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$. A la inversa, al decrecer ρ_2 , la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece.

El decrecimiento observado de la abcisa no se puede relacionar con el decrecimiento de h_1 . Por tanto, h_2 no puede ser constante. Luego sólo queda suponer que también decrece h_2 .

- 2) Para ρ_2 constante, h_2 debe crecer 1,33 veces. Pero el crecimiento de h_2 es imposible, porque la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ en el punto de SEV 4 decrece. Además, para ρ_2 constante, ni se aprecia crecimiento, ni puede decrecer demasiado la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Entonces se incluyen las posibilidades de las combinaciones 3.^a y 4.^a.

- 3) Aumento simultáneo de h_2 con decrecimiento de ρ_2 no es admisible; estas dos variaciones llevan al crecimiento de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$.

Así pues, a la variación observada de la curva de SEV 4 respecto a la curva de SEV 3 sólo corresponde una posibilidad de variación de h_2 y ρ_2 en el punto de SEV 4; estos dos parámetros decrecen al mismo tiempo, h_2 en menor grado que ρ_2 .

Supongamos que en el punto de SEV 3 se conoce el corte eléctrico:

$$\begin{array}{ll} h_1 = 60 \text{ m.} & \rho_1 = 300 \text{ ohm.m.} \\ h_2 = 180 \text{ m.} & \rho_2 = 160 \text{ ohm.m.} \\ h_3 = \infty. & \rho_3 = \infty; \\ \mu_1 = 1/19 & \nu_1 = 3. \end{array}$$

Calculemos en primer lugar cómo influye la variación de sólo los parámetros h_1 y ρ_1 en el punto de SEV 4 en la abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV. Para ello admitimos que en el punto de SEV 4 los valores h_2 y ρ_2 quedan iguales a los del punto 3. En este caso, el corte eléctrico para el punto de SEV 4 será:

$$\begin{array}{ll} h_1 = 30 \text{ m,} & \rho_1 = 90 \text{ ohm.m.} \\ h_2 = 180 \text{ m,} & \rho_2 = 16 \text{ ohm.m.} \\ h_3 = \infty, & \rho_3 = \infty. \\ \mu_1 = 1/5,6 = 0,178; & \nu_1 = 6. ; \quad S = 11,5 \text{ mho.} \end{array}$$

Con ayuda de los gráficos de las figuras 81 y 90, hallamos los siguientes datos (tabla 24):

TABLA 24

CALCULO DE LA VARIACION DEL PUNTO $\bar{\rho}_{min}$ Y VALORES DE S EN LA CURVA DE SEV 4 RESPECTO A LA CURVA DE SEV 3 DE REFERENCIA, PARA h_2 Y ρ_2 CONSTANTES

Puntos de SEV	μ_1	ν_1	abc. $\bar{\rho}_{min}$ (m)	ord. $\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)	S (mho)
3	1/19	3	320	33	11,5
4	0,178	6	168	21	11,5

Observamos que la disminución de h_1 (en 2 veces) y de ρ_1 (en 3,3 veces) al pasar al punto de SEV 4, para h_2 y ρ_2 constantes, supone una disminución de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ en 1,89 veces y de la ordenada en 1,57 veces. S, en este caso, no varía. Se sobreentiende que si en la curva de SEV 4 se observa una disminución en la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ de dos veces y en la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de 2,22 veces, en parte, estas variaciones de abcisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ son imputables a la variación de los parámetros h_2 y ρ_2 , correspondiendo al decrecimiento de la abcisa en $2/1,89 = 1,06$ veces y decrecimiento de la ordenada en $2,22/1,57 = 1,41$ veces. El valor S, dependiente de estos parámetros, crece 1,33 veces.

Por el método anterior de análisis de las posibles combinaciones de variación de h_2 y ρ_2 para la variación observada en la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ en la curva de SEV hallamos que estos dos parámetros decrecen, haciéndolo ρ_2 en mayor proporción. La expresión numérica de este decrecimiento de h_2 y ρ_2 se puede valorar con ayuda de la siguiente aproximación a su solución más probable. En las condiciones dadas se observa que ρ_2 decrece más de 1,33 veces. Supongamos que decrece 1,5 veces. Entonces h_2 puede decrecer en $1,5/1,33 = 1,13$ veces. Tendremos entonces en el punto de SEV 4:

$$\mu_1 = 1/5,6 \times 1,5 = 1/8,4; \quad \nu_1 = 6/1,13 = 5,3$$

Utilizando los gráficos de las figuras 81 y 90, obtenemos los siguientes datos (tabla 25):

TABLA 25

PRIMERA APROXIMACION EN EL CALCULO DE μ_1 Y ν_1 EN EL PUNTO DE SEV 4

	μ_1	ν_1	abc. $\bar{\rho}_{min}$ (m)	ord. $\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)
SEV 4	1/5,6=0,178	6	168	21
	1/8,4=0,119	5,3	164	15,4
variación	disminuye 1,5 veces	disminuye 1,13 veces	disminuye 1,02 veces	disminuye 1,36 veces

Como vemos, el decrecimiento supuesto de h_2 y ρ_2 no satisface la variación observada de la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$

de la curva de SEV 4. Supongamos que ρ_2 decrece 1,7 veces. Entonces es necesario que h_2 disminuya en $1,7/1,33=1,28$ veces y tendremos en el punto de SEV 4, $\mu_1=1,9,5$, $\nu_1=4,7$. En la tabla 26 se dan los datos obtenidos para estas condiciones.

TABLA 26
SEGUNDA APROXIMACION EN EL CALCULO DE μ_1 Y ν_1
EN EL PUNTO DE SEV 4

	μ_1	ν_1	abc. $\bar{\rho}_{min}$ (m)	ord. $\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)
SEV 4	1/5,6	6	168	21
	1/9,5=0,105	4,7	160	15
variación	disminuye 1,7 veces	disminuye 1,28 veces	disminuye 1,05 veces	disminuye 1,4 veces

El último supuesto responde ya bastante bien a la variación observada de la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV 4.

Por tanto, podemos esperar el valor siguiente más probable de los parámetros h_2 y ρ_2 en el punto de SEV 4:

$$h_2 = 30 \times 4,7 \approx 140 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 90/9,5 \approx 9,5 \text{ ohm.m}$$

Los verdaderos parámetros de la segunda capa en el punto de SEV 4 son: $h_2=150$ m, $\rho_2=10$ ohm.m.

En la práctica, un tal análisis de las curvas de SEV es a veces muy prolijo y se hace irrealizable: exigiría mucho tiempo. Sin embargo, es fácil de efectuar para cierto número de puntos de SEV de apoyo. Este análisis señala que para el corte eléctrico de tres capas de tipo H ($\rho_3 = \infty$), el examen atento de los planos (y perfiles) utilizados en la interpretación cualitativa de las curvas de SEV, puede dar una idea general sobre la variación relativa de la resistividad y espesor de la capa conductora. La existencia de uno o varios pozos en el terreno investigado, llevados hasta el horizonte de apoyo, permite hallar en una serie de puntos de SEV las características cuantitativas de esta variación.

Veamos un ejemplo práctico. Con la curva paramétrica de SEV 1 (fig. 121) se ha determinado que:

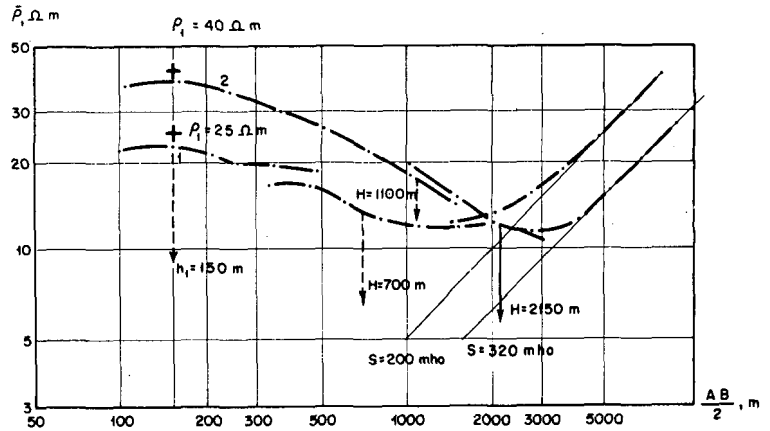
$$h_1 = 150 \text{ m} \quad \rho_1 = 25 \text{ ohm.m}$$

$$h_2 = 550 \text{ m} \quad \rho_2 = 2,8 \text{ ohm.m}$$

$$H = 700 \text{ m.}$$

Como vemos, en el punto de SEV 1, $S=200$ mho, abcisa de $\bar{\rho}_{min}=1.200$ m y ordenada de $\bar{\rho}_{min}=12$ ohm.m. En la curva de SEV 2, situado a algunos kilómetros del punto de SEV 1, se tiene $h_1=150$ m, $S=320$ mho, $\rho_1=40$ ohm.m, abcisa de $\bar{\rho}_{min}=2.700$ m y ordenada de $\bar{\rho}_{min}=12$ ohm.m.

Fig. 121.—
Ejemplo de
interpretación
errónea de curva
de SEV.



Al pasar del punto de SEV 1 al punto de SEV 2 se tienen las siguientes variaciones en las citadas curvas de SEV: h_1 permanece constante; ρ_1 crece 1,6 veces; abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crece 2,2 veces; ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ permanece constante; S crece 1,6 veces.

En el punto de SEV 2 se ha tomado también la misma resistividad (2,8 ohm.m) para el nivel conductor, que en el punto de SEV 1. Un análisis elemental de las curvas de SEV demuestra que esto supone un error considerable de interpretación. El desplazamiento del mínimo y el crecimiento de S en el punto de SEV 2 sólo puede depender de la variación de los parámetros de la capa conductora. El aumento de ρ_1 en 1,6 veces no tiene influencia práctica ni en la posición del mínimo ni en S . El crecimiento de $S = h_2/\rho_2$ en 1,6 veces, con aumento simultáneo del valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ para la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ constante, está ligado no sólo al crecimiento de h_2 , sino también al de ρ_2 (en menor proporción que con el crecimiento de h_2). Por consiguiente, el parámetro ρ_2 no puede permanecer fijo. En realidad, si en el punto de SEV 2 sólo creciera h_2 en 1,6 veces, entonces lo que ocurriría es que la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ decrecería, pero ella tiene el mismo valor que en el punto de SEV 1, luego ρ_2 crece al crecer h_2 .

La abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ crecía 2,2 veces. Esto impide pensar que el espesor h_2 creciera en mayor proporción. A la vista de los gráficos citados, figuras 81 y 90, como se indicó en el ejemplo anterior, se puede concluir que en el punto de SEV 2 el espesor h_2 crecerá aproximadamente 3,6 veces y ρ_2 , 2,3 veces. Por tanto, se deduce de ello que ρ_2 será igual a $2,8 \times 2,3 \approx 6,4$ ohm.m. El espesor de la capa conductora en el punto de SEV 2 hay que llevarlo a unos 2.000 m, en lugar de los 900-1.000 m indicados por el interpretador. Por consiguiente, la profundidad del horizonte de apoyo, es de esperar que sea aquí de unos 2.100 m en lugar de los 1.100 m obtenidos al despreciar el análisis de las curvas de SEV en la interpretación.

En la fig. 122 se tiene un corte esquemático de una estructura formada por un material de resistividad muy alta recubierto por sedimentos conductores de resistividad variable. La capa superior tiene un espesor constante de $h_1 = 50$ m y resistividad, también constante, de $\rho_1 = 20$ ohm.m.

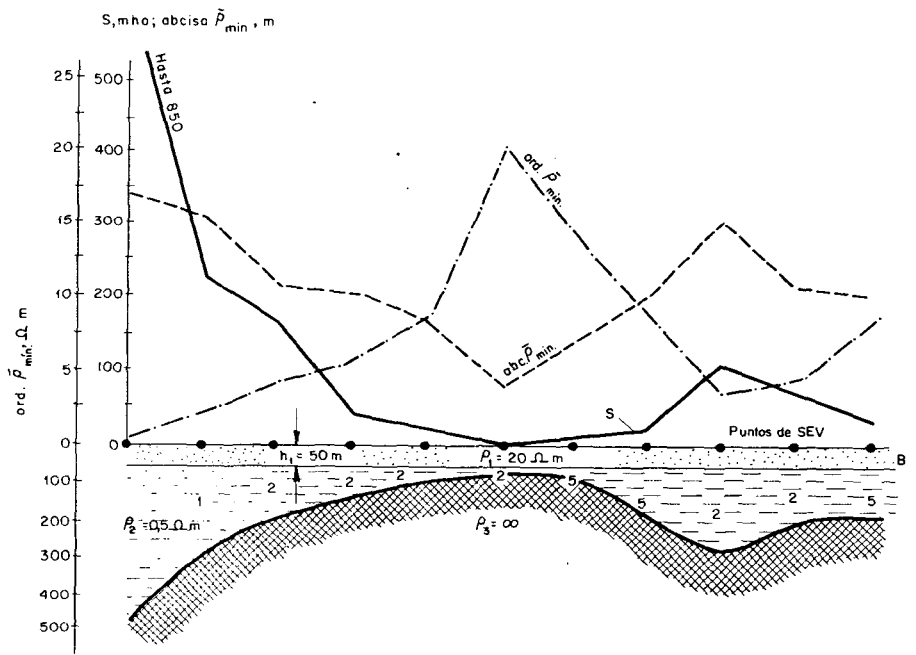
La profundidad del horizonte de apoyo oscila entre 75 y 500 m. Sobre el corte se han dibujado tres gráficas con los valores, obtenidos de las curvas de SEV, de abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ y S. El conjunto de estas gráficas caracteriza suficientemente bien la marcha del horizonte de apoyo y la variación de la resistividad de la capa conductora. Un examen detallado de las mismas puede conducir a unas conclusiones más o menos exactas sobre el corte eléctrico en cuestión.

Intente el lector analizar los perfiles, en el supuesto de que la magnitud de los parámetros de la capa conductora y la marcha de la superficie del horizonte de apoyo sea desconocida totalmente por él.

20.6. Plano de ángulos de inclinación α

Estos planos, que caracterizan la variación del ángulo de inclinación de la rama derecha de la curva de SEV con el eje de abcisas, se hacen en el caso de que el horizonte de apoyo tenga resistividad finita. El ángulo α se toma de la curva de SEV, como se indicó anteriormente (fig. 108). Si el ángulo de inclinación varía en el terreno que se investiga de modo desordenado, se suelen confeccionar, en lugar de planos de igual valor de α , otros indicando las zonas en que la magnitud del citado ángulo, varía entre límites prefijados.

Fig. 122.—Curvas de SEV de tipo H, $\rho_3 = \infty$. Relación entre la interpretación cualitativa de las gráficas y el corte geoelectrico.



A la vista de los planos de ángulo α , en estrecha correlación con otros planos de interpretación cualitativa (de abcisas y ordenadas de $\bar{\rho}_{min}$, resistividad y otros), y teniendo en cuenta la ley de variación de α en función de los parámetros del corte, se puede también, como en el caso de $\rho_3 = \infty$, conseguir una idea general de tipo cualitativo de la variación de los parámetros de la capa conductora y de la marcha de la superficie del horizonte de apoyo.

20.7. Planos L

Se denomina así al plano que caracteriza la variación de la abscisa L del punto en que la tangente a la rama derecha de la curva de SEV corta al eje de abscisas, en caso de resistividad finita del horizonte de apoyo. Recordando la analogía que existe entre las magnitudes S y L, se puede suponer que la variación de L, en primera aproximación, va ligada a la variación de la profundidad del horizonte de apoyo, siempre que la resistividad media del recubrimiento de esta capa permanezca aproximadamente constante.

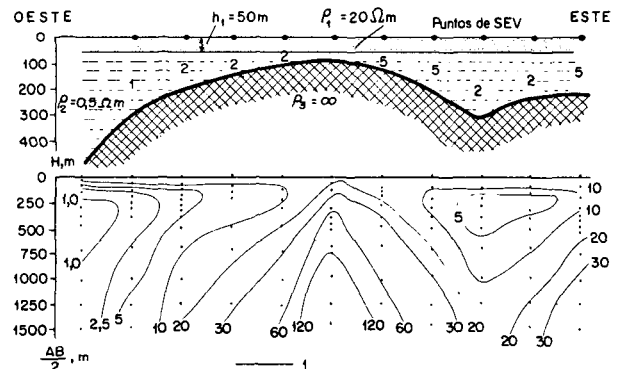
Este valor L se toma directamente de los impresos de las curvas de SEV. Estos planos de igual valor de L se examinan, como todos los planos de interpretación cualitativa, en estrecha correlación con los restantes.

20.8. Corte de resistividades aparentes

Para poner de manifiesto las variaciones del corte eléctrico en las diversas direcciones, se hacen, con frecuencia, cortes de resistividades aparentes.

Para ello, en cada punto de SEV a lo largo de la línea del perfil dado, se llevan hacia abajo, en la vertical y frente a la correspondiente semiseparación $AB/2$, trazada a escala logarítmica, o mejor aritmética, la medida del valor de $\bar{\rho}$. A continuación se unen los puntos de igual resistividad. De este modo se obtienen unos mapas, en un plano vertical, que se denominan cortes de resistividades aparentes (fig. 123).

Fig. 123.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 = \infty$. Corte de resistividades aparentes, en comparación con el corte geoelectrico. 1.—Isolíneas $\bar{\rho}$.



Estos cortes dan idea de la variación de $\bar{\rho}$ con la profundidad en la dirección dada y también caracterizan, hasta cierto punto, la marcha de las capas del corte y en particular del horizonte de apoyo. En la figura 123 el corte de resistividades corresponde a la misma estructura indicada en la figura 122. La parte central del corte pone de manifiesto una subida brusca de $\bar{\rho}$ con el aumento de la profundidad de investigación. Ello corresponde a una subida del horizonte de apoyo. El descenso de la resistividad aparente al Este y especialmente al Oeste de la parte central del perfil puede indicar el hundimiento del horizonte de apoyo, así como el descenso de la resistividad verdadera de la capa intermedia del corte, más conductora. La delimitación de influencia de cada una de estas causas en la variación de la resistividad aparente es difícil normalmente e

incluso imposible a veces. Sirve de alguna ayuda en este caso el análisis conjunto de la variación de todos los gráficos de interpretación cualitativa. Por ejemplo, al obtener en el corte de resistividades, zonas de $\bar{\rho}$ mínimo contorneadas por isóneas de 1 ohm.m al Oeste y de 5 ohm.m al Este, no es posible saber si ello responde a un crecimiento más brusco de la profundidad del horizonte de apoyo al Oeste o a un descenso mayor en esta dirección de la resistividad verdadera de la capa conductora.

En las gráficas de la figura 122, en que se comparan las variaciones de los valores S , abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, se aprecia que el mínimo de $\bar{\rho}$ más brusco al Oeste se puede vincular no sólo con la baja más intensa del horizonte de apoyo, sino también con el descenso en esta parte de la resistividad verdadera de la roca en comparación con su resistividad en la parte oriental del itinerario.

La forma de las isóneas de resistividad aparente en la parte superior del corte evidencia que el sustrato rocoso desciende más bruscamente hacia el Oeste que hacia el Este.

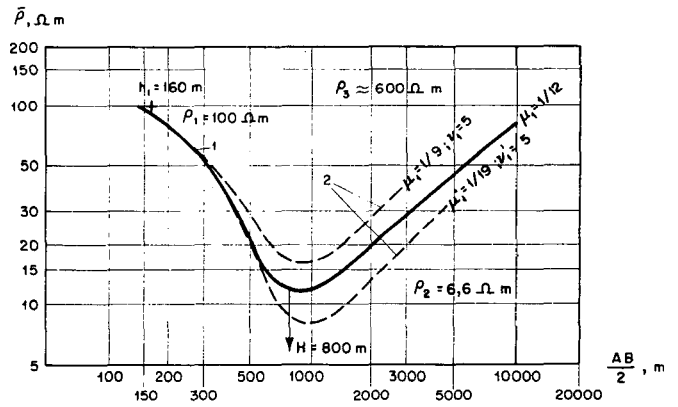
20.9. Cálculo del parámetro ρ_2

Como ya se ha indicado, la evaluación de la magnitud de la resistividad ρ_2 en el corte de tres capas es uno de los problemas principales que se presenta en la interpretación cualitativa. En realidad el estudio de los parámetros se inicia ya en el momento del trabajo de campo y sólo se da por acabado con la interpretación cuantitativa del material de SEV. Durante el proceso de trabajo de campo se estudia la resistividad en los afloramientos y cerca de los pozos existentes mediante curvas de SEV paramétricas.

La resistividad media en los afloramientos (normalmente con ayuda de perfiles de SEV poco profundos con el dispositivo AB extendido sobre la roca) lo más frecuente es que no pueda tomarse como base para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV. La resistividad de la roca que yace en profundidad con frecuencia en los afloramientos superficiales cambia bastante a causa de la influencia de los procesos de desintegración de la misma, cambio en las condiciones hidrogeológicas y otras causas. Por ello los valores de la resistividad, tomados como base de partida de la interpretación se fijan principalmente mediante curvas paramétricas de SEV próximos a pozos y con ayuda del análisis de todo el conjunto de curvas de SEV, cuyo camino ha sido trazado en lo expuesto anteriormente. Veamos un ejemplo del modo de calcular ρ_2 , mediante los datos de los sondeos mecánicos y las diagrfias de los mismos.

Supongamos que por los resultados de la testificación de pozos se tiene un corte geoelectrico de tipo H con $\rho_1 \approx 90$ ohm.m, $\rho_2 \approx 5$ ohm.m, profundidad de la superficie del horizonte de apoyo de 800 m y resistividad de la misma $\rho_3 \approx 600$ ohm.m. En la figura 124 se muestra la curva de SEV obtenida cerca de dicho sondeo mecánico. Calculemos el valor del parámetro ρ_2 del corte, que satisface la marcha de esta curva, para la profundidad indicada del horizonte de apoyo.

Fig. 124.—Curvas de SEV de tipo H. Cálculo de ρ_2 con ayuda de curva paramétrica de SEV obtenidas en las proximidades de un sondeo mecánico.
 1.—Curva de SEV que se interpreta;
 2.—Curvas de SEV del ábaco 20.



Interpretando la parte izquierda de la curva de SEV con ayuda del ábaco de dos capas, obtenemos provisionalmente $h_1 = 160$ m (no se tiene en cuenta normalmente la posible anisotropía de la primera capa), $\rho_1 = 100$ ohm.m. De aquí se deduce el espesor del horizonte conductor $h_2 = 800 - 160 = 640$ m, $\nu_1 = h_2/h_1 = 4$.

En la colección de curvas teóricas de SEV de tres capas, escogemos el ábaco correspondiente a este parámetro ν_1 y, dentro de él, la curva (directamente o por interpolación) que coincide con nuestra curva de SEV. Entonces, el origen de coordenadas del ábaco, al superponer ambas curvas, indicará el valor definitivo de h_1 y ρ_1 y el módulo μ_1 de dicha curva del ábaco da la relación ρ_2/ρ_1 . Con ello queda resuelto el problema, ya que $\rho_2 = \mu_1 \cdot \rho_1$.

Si en la colección no existe el ábaco calculado para $\nu_1 = 4$, en tal caso se hace uso de un ábaco con módulo ν_1' contiguo, si en las condiciones del corte estudiado es aplicable el principio de equivalencia (en S), de modo que al sustituir ν_1 por ν_1' , con la variación correspondiente de μ_1 , la curva de SEV no varía prácticamente de forma. En cada caso hay que comprobar la posibilidad de tal sustitución, con ayuda del diagrama de equivalencia (fig. 71). Si ello es posible, entonces, por el ábaco de módulo ν_1' se halla μ_1' y a continuación el correspondiente valor observado de ν_1 :

$$\mu_1 = \nu_1 \cdot (\mu_1' / \nu_1')$$

En nuestro caso ($\nu_1 = 4$, $\mu_1 \approx 1/18$), como se ve en el ábaco de equivalencia, se puede tomar en lugar de $\nu_1 = 4$, $\nu_1' = 5$. Usando el ábaco 20 ($\rho_3 = \infty$) calculado para este parámetro, obtenemos (fig. 124) interpolando entre $\mu_1' = 1/9$ y $\mu_1' = 1/19$:

$$\mu_1' = 1/12$$

Pasando al valor $\nu_1 = 4$, se halla:

$$\mu_1 = 4 \cdot (1/5 \cdot 12) = 1/15$$

De aquí se obtiene la incógnita $\rho_2 = \rho_1 \cdot \mu_1 \approx 6,6$ ohm.m

Se comprende fácilmente que en este caso de corte de tres capas, lo mismo que en el corte de tipo A, obtenemos el valor de ρ_2 que caracteriza la resistividad longitudinal de la capa conductora, si ella es anisótropa ($\rho_2 = \rho_{12}$).

Supongamos ahora que en el punto dado de SEV paramétrico no es aplicable el principio de equivalencia. Entonces debemos recurrir a la obtención del ábaco necesario por métodos gráficos. Sin embargo, lo más frecuente es servirse en ese caso del ábaco auxiliar H (fig. 55) y del ábaco de dos capas. El uso de este método para el cálculo de ρ_2 se verá más claramente más adelante, cuando veamos su aplicación en la determinación del espesor h_2 de la capa conductora en el corte de tipo H.

En el caso de resistividad infinitamente grande del horizonte de apoyo, el cálculo de ρ_2 se facilita conociendo el valor de S , obtenido del impreso de la curva de SEV. En este caso, ρ_2 se calcula del modo siguiente:

$$\rho_2 = h_2 / (S - S_1), \text{ siendo } S_1 = h_1 / \rho_1$$

Si en el terreno investigado no existen pozos y las curvas de SEV no corresponden a cortes en que es aplicable el principio de equivalencia, ρ_2 puede calcularse sin aquellos sondeos, mediante la ayuda de los ábacos de curvas de tres capas y nomogramas de A. I. Bogdanov.

En la zona investigada, ante todo, hay que subrayar las curvas de SEV que reflejan los cortes en que se ve claramente que no es aplicable el principio de equivalencia. Esto se puede hacer usando, por ejemplo, los gráficos de las figuras 98, 99 ó 125 y 126, que expresan la relación entre S/S_1 y la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ de la curva de SEV (en el caso de $\rho_3 = \infty$) o entre L/S y la posición del punto $\bar{\rho}_{min}$ (para ρ_3 próximo a $\rho_1, \sqrt{\rho_1 \rho_2}$). Si el punto señalado, para la curva de SEV indicada, en el gráfico correspondiente queda en la zona en que se cruzan las líneas μ_1 y ν_1 , ello evidencia que en el corte eléctrico correspondiente a la curva de SEV dada, no es aplicable el principio de equivalencia.

En el caso indicado, ρ_2 y h_2 pueden calcularse simplemente. Si el punto se encuentra en la zona del gráfico en que las líneas de igual valor de μ_1 y ν_1 son paralelas entre sí y, por tanto, no se puede calcular ρ_2 ni h_2 , entonces el corte estudiado se encuentra en el límite de aplicación del principio de equivalencia. Denominamos para simplificar, a las curvas no equivalentes en el primer caso y equivalentes en el segundo. Haciendo el plano con la situación de estas y otras curvas de SEV en la superficie explorada se puede ya con mayor seguridad realizar su análisis.

Los valores de ρ_2 y h_2 en la región en que se encuentran las curvas de SEV no equivalentes podrían ser fijados también por los gráficos indicados, es decir, solucionar de una vez el problema de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV. Sin embargo, a causa de la interpolación dificultosa a escala logarítmica y escasez de valores de ρ_3 para los que

existen los gráficos indicados, sólo se calculan con ellos los valores de ρ_2 y h_2 de modo aproximado. Para su cálculo más exacto se deben utilizar los nomogramas de A. I. Bogdanov.

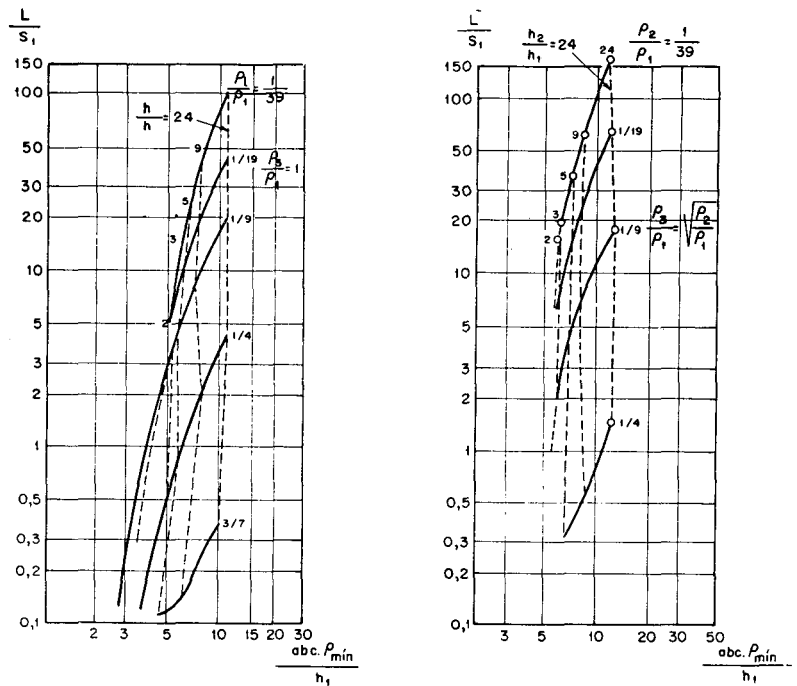


Fig. 125.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 \neq \infty$. Relación entre la variación de L/S_1 y $abc. \bar{\rho}_{min}/h_1$.

Supongamos que se pide hallar el valor de ρ_2 para el punto de SEV cuya curva se muestra en la figura 127. Por el ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 15$ m, $\rho_1 = 30$ ohm.m. A la vista de la posición del final de la rama derecha, ρ_3 es del orden de 90 ohm.m, o sea $\rho_3 = 3 \cdot \rho_1$. En la curva de SEV obtenemos $ord. \bar{\rho}_{min}/\rho_1 = 6/30 = 0,2$; $abc. \bar{\rho}_{min}/h_1 = 75/15 = 5$. Para saber si esta curva de SEV es equivalente utilizamos los gráficos de

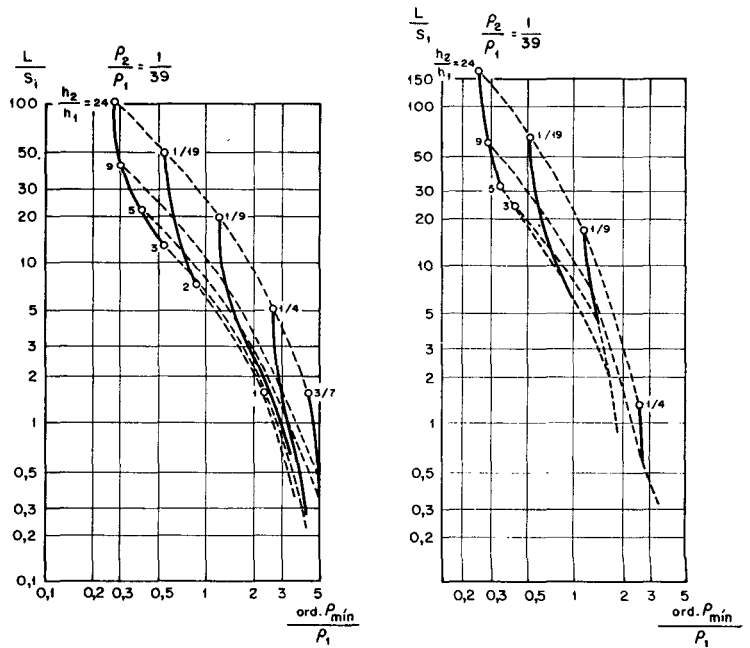
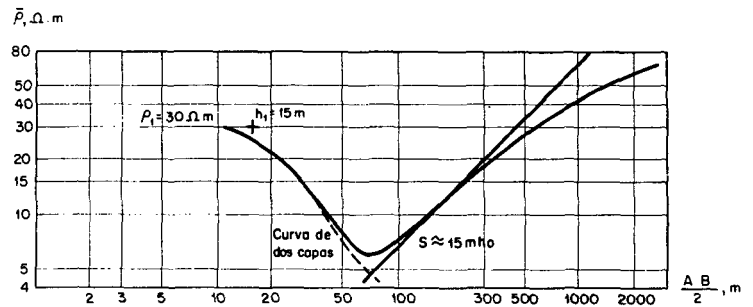


Fig. 126.—Curvas de SEV de tipo H. $\rho_3 \neq \infty$. Relación entre la variación de L/S_1 y $ord. \bar{\rho}_{min}/\rho_1$.

las figuras 98 y 99, construidas para $\rho_3 = \infty$. Si comprobamos que la curva no es equivalente para $\rho_3 = \infty$, entonces tampoco será equivalente para $\rho_3 \neq \infty$. Construyendo la asíntota, de modo aproximado, de la rama ascendente de la curva dada de SEV, calculamos $S \approx 15$ mho y $S/S_1 \approx 30$.

La posición del punto para los valores de S/S_1 , ord. $\bar{\rho}_{min}/\rho_1$ y abc. $\bar{\rho}_{min}/h_1$, en ambos gráficos demuestra que la curva de SEV dada no es equivalente. Utilicemos los ábacos de A. I. Bogdanov.

Fig. 127.—
Ejemplo de interpretación de curvas de SEV de tipo H, con ayuda del nomograma de A. I. Bogdanov.



Puesto que en el corte dado $\rho_3/\rho_1 \approx 3$, hay que usar el nomograma 12 ($\log \rho_3/\rho_1 = 0,5$; $\rho_3/\rho_1 \approx 3,16$) (tabla 8). En la curva de SEV hallamos el valor $\bar{\rho}/\rho_1$ y su logaritmo para $AB/2$ igual a $4 h_1$, $8 h_1$, $16 h_1$ y $32 h_1$ (tabla 27).

TABLA 27

INTERPRETACION DE SEV CON AYUDA DE LOS
NOMOGRAMAS DE A. I. BOGDANOV

$AB/2$ (m)	$\bar{\rho}/\rho_1$	$\log \bar{\rho}/\rho_1$
60	0,216	1,33
120	0,282	1,45
240	0,50	1,7
480	0,865	1,94

Del nomograma 12 calcamos (fig. 65) las cuatro curvas correspondientes a los valores de $\log (\bar{\rho}/\rho_1)$ dados y buscamos los puntos en que se cortan las mismas (fig. 128). Estas curvas (en las que dos — $\log 1,70$ y $\log 1,94$ — se confunden) no se cortan en un punto y sus intersecciones forman un triángulo curvilíneo. Esto es imputable a error de medida, junto a que el corte estudiado en la realidad se diferencia del corte de tres capas, y a otras causas. Las coordenadas de los puntos dentro del triángulo dan valores probables de los parámetros de la segunda capa. Evidentemente, las coordenadas de los vértices de este triángulo indican límites posibles de variación de los parámetros. Superponiendo el plano en un impreso con escala logarítmica obtenemos directamente:

$$h_2/h_1 = 4,1 \text{ y } h_2/h_1 = 2,4$$

$$\rho_2/\rho_1 = 0,16 \text{ y } \rho_2/\rho_1 = 0,10$$

Las medias aritméticas de estas magnitudes son:

$$h_2/h_1 = 3,25; \quad \rho_2/\rho_1 = 0,13$$

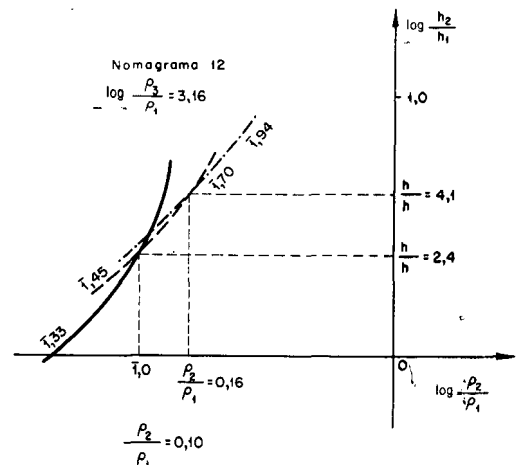
Los valores así obtenidos están próximos a los puntos de corte de las tres curvas ($\bar{1},33$; $\bar{1},70$; $\bar{1},94$). Teniendo en cuenta que en el punto investigado de SEV $\rho_1 = 30$ ohm.m, hallamos $\rho_2 = 30 \cdot 0,13 = 3,9$ ohm.m.

El punto en que se cortan las tres curvas indicadas del nomograma utilizado indican $\rho_2/\rho_1 = 0,115$; de aquí, $\rho_2 \approx 3,4$ ohm.m. Por tanto, el valor ρ_2 puede estar comprendido entre 3,4 y 3,9 ohm.m.

El examen de los errores cometidos en la valoración de ρ_2 con ayuda de los nomogramas lleva a la conclusión de que, incluso en el caso favorable de que el error de medida de $\bar{\rho}$ no exceda de $\pm 5\%$ y de que el corte tenga realmente tres capas, el error en el cálculo de ρ_2 puede ser de $\pm 15\%$.

Estimando en la zona investigada los valores del parámetro ρ_2 en una serie de puntos de SEV en que se observen curvas no equivalentes se puede, mediante un análisis comparativo de las curvas de SEV, intentar calcular ρ_2 en los puntos de SEV que indican curvas equivalentes.

Fig. 128.—
Construcción,
para la
interpretación
de curvas de SEV
de tres capas,
con el nomograma
de A. I. Bogdanov.



Advertimos que por el examen de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV, puede obtenerse el valor de ρ_2 directamente por la posición del mínimo de las curvas. Hemos visto anteriormente que para el corte de tres capas de tipo H, en caso de pendiente muy suave del mínimo de la curva, el valor de su ordenada está muy próximo al valor de ρ_2 . La desviación de la ordenada $\bar{\rho}_{min}$ de ρ_2 para $h_2/h_1 \geq 20$ no excede de +10 a +5%, incluso para ρ_2/ρ_1 pequeño ($\rho_2/\rho_1 \approx 0,01$). Tan sólo hay que comprobar que la curva de SEV de tipo H con mínimo estabilizado corresponde realmente a un corte de tres capas, es decir, el mínimo no se produce por la alternancia de capas conductoras y resistivas, como ocurre con frecuencia en la práctica.

Si en la zona estudiada no hay posibilidad de fijar el parámetro ρ_2 con suficiente exactitud mediante el análisis de todas las curvas de SEV de dicha zona, se toma, condicionalmente, su valor más probable. Sea como sea y para la interpretación cuantitativa del material de SEV se comienza teniendo ya una idea completamente clara de la magnitud de la resistividad de la capa conductora en todo el terreno explorado.

En el proceso de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV esta idea puede variarse en cierto grado, pero es conveniente partir de la base en las condiciones generales de variación del parámetro ρ_2 , estudiadas cuidadosamente mediante la interpretación cualitativa.

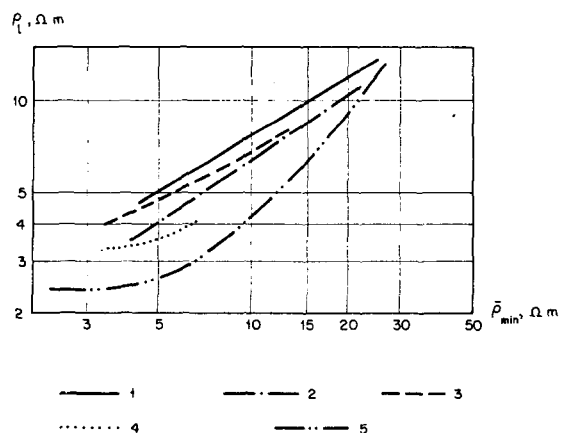
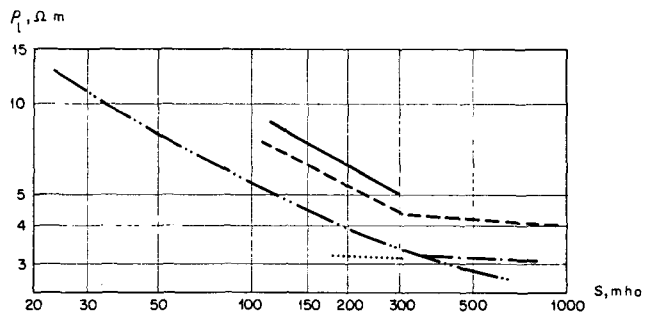
Con frecuencia, en lugar de la resistividad paramétrica ρ_2 , se calcula la resistividad media longitudinal ρ_l de la primera y segunda capas del corte para $\rho_3 = \infty$ ó ρ_l para $\rho_3 \neq \infty$.

En el caso de $\rho_3 = \infty$ el valor de ρ_l se determina fácilmente con ayuda de curvas paramétricas de SEV cerca de algún sondeo mecánico, que nos da la profundidad H del horizonte de apoyo.

$$\rho_l = H/S$$

siendo S la conductancia longitudinal total, valor que se obtiene del impreso de la curva de SEV.

Fig. 129.—
Relación práctica
entre ρ_l y S, ρ_l
y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$
en una
investigación
efectuada en la
región oriental
(según
V. I. Fomin).
1.—Elemento de
parcela SZ.
2.—Elemento de
parcela IUV.
(En el corte
existen
sedimentos de
Cretácico
superior.)
3.—Elemento de
parcela SZ.
4.—Elemento de
parcela IUV.
(En el corte no
hay Cretácico
superior.)
5.—Parcelas
de anomalía
máxima de la
fuerza de
la gravedad
(horizonte de
apoyo poco
profundo;
 $\rho_3 = \infty$).



Si $\rho_3 \neq \infty$, entonces por la posición de la tangente en el punto de inflexión de la rama derecha ascendente de la curva paramétrica de SEV, de la que se conoce también la profundidad del horizonte de apoyo, se calcula directamente la magnitud ρ_r (fig. 108).

Para el estudio de ρ_l y ρ_r y su variación dentro de los límites de la zona explorada se utilizan ampliamente las relaciones establecidas más arriba entre estas magnitudes y la posición del mínimo de las curvas de SEV, los valores S y L y el ángulo de inclinación α .

Si en la zona investigada se tienen algunos sondeos mecánicos o puntos de exploración sísmica, mediante los que se conoce la profundidad del horizonte eléctrico de apoyo, entonces calculando para cada una de sus curvas paramétricas de SEV los valores ρ_l o ρ_r , se halla la dependencia gráfica entre ρ_l y S u ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, entre ρ_r y α , L u ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Esta dependencia se extiende a continuación a todo el terreno explorado, lo que permite fijar los valores de ρ_l o ρ_r en cada uno de los puntos de SEV.

A título de ejemplo, en la figura 129 se tiene la dependencia gráfica entre ρ_l y S , ρ_r y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, realizada por V. I. Fomin con ayuda de los resultados de SEV paramétricos próximos a sondeos mecánicos, en una investigación llevada a cabo en la región oriental. Utilizando estos gráficos, es fácil fijar la profundidad del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$) en cualquier punto de SEV en la zona estudiada.

21. Interpretación cuantitativa de curvas de SEV de tipo H

El examen de los métodos de interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de este tipo se puede dividir en dos partes: 1) caso en que el horizonte de apoyo reflejado en las curvas de SEV tiene resistividad infinitamente grande, y 2) caso de resistividad finita del horizonte de apoyo.

CASO $\rho_3 = \infty$

Las curvas de SEV de tres capas de tipo H para $\rho_3 = \infty$, se pueden interpretar de varios modos:

- 1) Comparación directa con curvas de tres capas calculadas, reunidas en ábacos.
- 2) Por los valores S , ρ_2 y ρ_l .
- 3) Con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov.

Además de estos métodos existen también métodos de interpretación aproximados:

- 4) Por los puntos de separación de curvas de SEV.
- 5) Por los valores S y $\bar{\rho}_{min}$.
- 6) Por comparación con curvas experimentales de SEV.

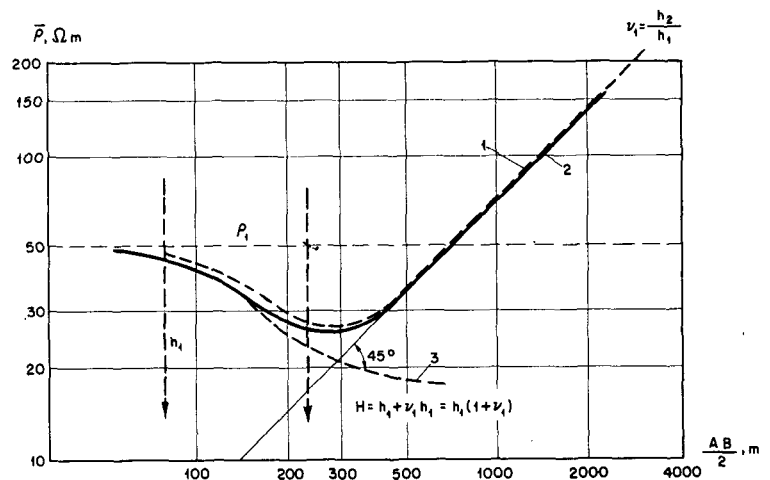
21.1. Interpretación con ayuda de ábacos

Como ya se dijo, para la interpretación de curvas de SEV de tres capas de tipo H ($\rho_3 = \infty$) existen ábacos de curvas calculadas para los parámetros h_2/h_1 de 1/9 a 24, ρ_2/ρ_1 de 1/300 a 2/3. Según las necesidades, se intercalan en los ábacos también curvas de SEV obtenidas gráficamente.

Supondremos que al comienzo del trabajo de interpretación cuantitativa se tiene calculado en cada punto de SEV el valor del parámetro ρ_2 con mayor o menor grado de exactitud.

Con ayuda del ábaco de dos capas se estiman previamente h_1 y ρ_1 (fig. 130) y por el valor conocido de ρ_2 se fija $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. A continuación, en la colección de ábacos se elige el que contiene las curvas de SEV con el valor μ_1 hallado y $\nu_1 = h_2/h_1$ variable. El impreso con la curva de SEV que hay que interpretar se coloca sobre el ábaco. Con un riguroso paralelismo de los ejes de coordenadas del ábaco y de la curva de campo, se traslada ésta última hasta la mejor coincidencia con una de las del ábaco. Entonces, el origen de coordenadas del ábaco marca en el impreso de campo el valor más exacto de h_1 y ρ_1 , y la curva del ábaco con la que se ha hecho coincidir la gráfica de campo da la relación del espesor de la segunda capa del corte investigado al espesor de la primera: $\nu_1 = h_2/h_1$. Esto da $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$. La profundidad del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$) se obtiene fácilmente como $H = h_1 + h_2$, lo que soluciona el problema de interpretación.

Fig. 130.—
Ejemplo de interpretación de curva de SEV de tres capas de tipo H.
1.—Curva de SEV que hay que interpretar;
2.—Curva de SEV del ábaco;
3.—Curva de SEV de dos capas.



Supongamos un ejemplo en el que es conocido $\rho_1 = 50$ ohm;m. Por consiguiente, la incógnita resulta ser $h_1 = 75$ m, $\rho_1 = 50$ ohm;m. De aquí, $\mu_1 = 12,5/50 = 1/4$. Superponiendo en el ábaco 84 la curva de SEV, se consigue la mejor coincidencia con la curva $\nu_1 = 2$; para ella, $h_1 = 80$ m, $\rho_1 = 50$ ohm;m. Por consiguiente, la incógnita resulta ser $h_2 = 2 \cdot 80 = 160$ m y $H = 80 + 160 = 240$ m.

Si al superponer la gráfica de SEV que se va a interpretar no existe coincidencia con ninguna curva del ábaco, entonces se calcula $\nu_1 = h_2/h_1$ mediante interpolación a escala logarítmica entre los valores correspondientes a dos curvas contiguas más

aproximadas. En la práctica, dicha interpolación se efectúa fácilmente con ayuda de una escala rayada recortada del impreso de SEV (fig. 131). Esta escalilla se coloca sobre las ramas ascendentes de las curvas del ábaco entre las que queda la gráfica de SEV objeto de la interpolación (fig. 131 a) de modo que cada una de estas ramas ascendentes corte el eje horizontal de la escalilla en puntos cuyas abcisas sean iguales al correspondiente valor ν_1 de estas ramas. Entonces la abcisa del punto de corte de la rama ascendente de la gráfica de SEV dada, con este mismo eje horizontal de la escalilla indica el valor ν_1 buscado. En el ejemplo citado en la figura 131 a, la gráfica de SEV que se interpreta queda situada entre las curvas de SEV del ábaco $\nu_1 = 2$ y $\nu_1 = 3$ siendo el valor buscado $\nu_1 = 2,6$.

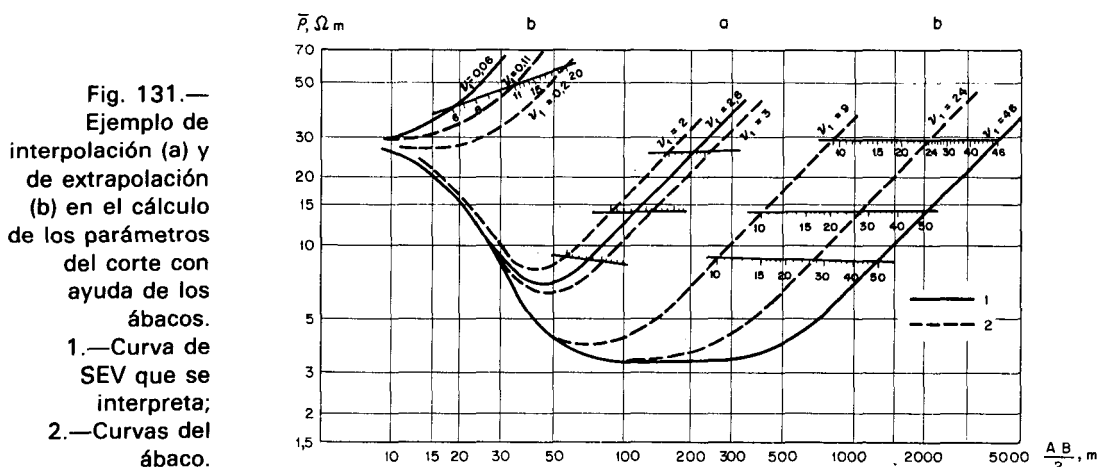


Fig. 131. — Ejemplo de interpolación (a) y de extrapolación (b) en el cálculo de los parámetros del corte con ayuda de los ábacos.
1.—Curva de SEV que se interpreta;
2.—Curvas del ábaco.

De modo análogo se puede calcular ν_1 mediante extrapolación, cuando la rama ascendente queda fuera del límite del último valor para el que existen curvas de SEV de tres capas calculadas en el ábaco ($\nu_1 = 1/9$, $\nu_1 = 24$). Para ello basta superponer, como se ha indicado, el eje horizontal de la escalilla sobre las ramas ascendentes de las curvas de SEV del ábaco contiguas y a un mismo lado de la rama ascendente de la gráfica que se interpreta ($\nu_1 = 9$ y 24 ó $\nu_1 = 1/5$ y $1/9$) (fig. 131 b). La abcisa del punto en que el eje horizontal de la escalilla corta a la rama ascendente de la curva de SEV dada fija la incógnita ν_1 .

Supongamos ahora la relación $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ calculada para el punto de SEV dado no corresponde a ningún ábaco de curvas calculadas de SEV de tres capas. En este caso se puede utilizar el correspondiente a un valor μ'_1 dado próximo al μ_1 observado, efectuando el cálculo correspondiente por el principio de equivalencia, una vez obtenido el valor μ'_1 . Para ello se utiliza el nomograma de A. M. Pylaev, calculando los límites de aplicación del citado principio de equivalencia en S (fig. 71). Conociendo μ_1 en el punto de SEV y los límites posibles de variación de μ'_1 , por el nomograma se puede calcular, si es factible, sin perturbación práctica de la forma de la curva de SEV, tomando en lugar del μ_1 observado el valor contiguo del ábaco μ'_1 . Si tal sustitución es posible, entonces hallando para el valor del ábaco μ'_1 su

correspondiente ν'_1 es necesario pasar al verdadero valor ν_1 para el μ_1 dado, utilizando la expresión del principio de equivalencia:

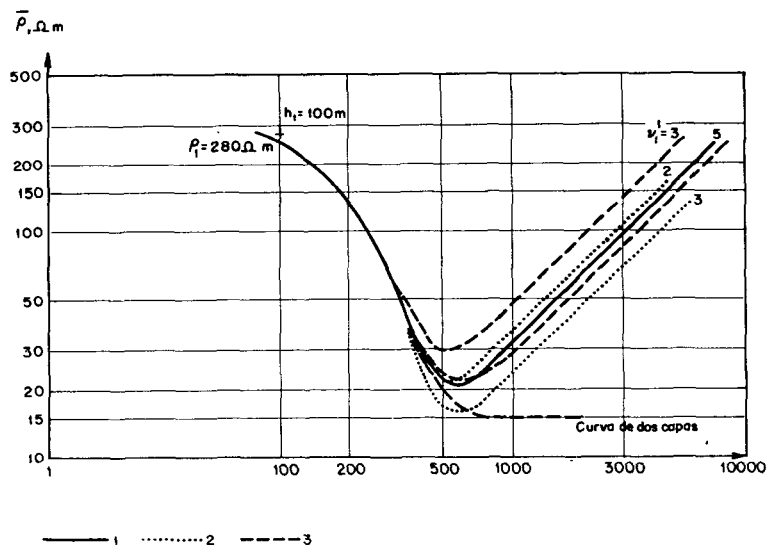
$$\nu_1 = \nu'_1 \cdot (\mu_1 / \mu'_1).$$

Veamos un ejemplo práctico. Supongamos que en el punto de SEV, cuya curva se da en la figura 132, se tiene $\rho_2 = 10$ ohm.m. Con ayuda del ábaco de dos capas hallamos $h_1 = 100$ m, $\rho_1 = 280$ ohm.m. De aquí, $\mu_1 = 1/28$. Los valores más próximos μ'_1 para los que existen ábacos calculados son $\mu_1 = 1/19$ y $1/39$. Utilizamos el nomograma de equivalencia (fig. 71) para ver si al corte eléctrico del punto de SEV le es aplicable el principio de equivalencia entre límites tales que permitan la variación de μ_1 hasta $1/19$ ó $1/39$. Supongamos que el valor más probable de ν_1 en la región investigada varíe de 1 a 3. Del nomograma para $\rho_3 = \rho_1$, obtenemos los datos siguientes:

Valores iniciales		Variación admisible de μ_1 (núm. de veces)	
μ_1	ν_1	disminución	aumento
1/28	1	ilimitado	1,87
1/28	3	1,6	1,38

Dado que en nuestro caso $\rho_3 = \infty$, los límites de variación admisibles de ν_1 (y ν_1) serán aún algo mayores que lo indicado por el nomograma.

Fig. 132.— Interpretación de curva de SEV de tipo H a la que es aplicable el principio de equivalencia.
1.—Curva de SEV que se interpreta, $\mu_1 = 1/28$;
2.—Curvas de SEV del ábaco para $\mu'_1 = 1/39$;
3.—Curvas de SEV del ábaco para $\mu'_1 = 1/19$.



Si en lugar de $\mu_1 = 1/28$ tomamos $\mu_1 = 1/39$, entonces disminuye μ_1 en 1,39 veces; si ponemos $\mu_1 = 1/19$ entonces aumenta esta relación en 1,47 veces. La primera variante es compatible con el principio de equivalencia, la segunda queda fuera de sus límites de aplicación.

Supongamos $\mu_1 = 1/39$ (ábaco 86). Entonces superponiendo la curva de SEV dada sobre este ábaco, obtenemos mediante interpolación $\nu'_1 = 2,25$.

Pasando el valor verdadero de μ_1 tenemos

$$v_1 = v'_1 \cdot (\mu_1 / \mu'_1) = 3,06;$$

de donde

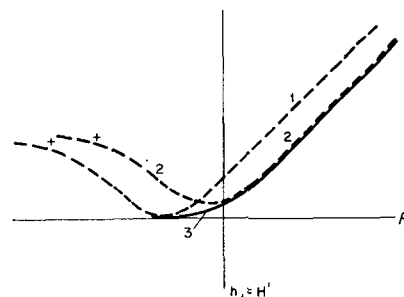
$$h_2 = 100 \cdot 3,06 \approx 300 \text{ m}; \quad H = 400 \text{ m}$$

En los casos en que el corte correspondiente al punto de sondeo no pueda aplicarse el principio de equivalencia, dentro de los límites deseados de variación de μ_1 , para la interpretación de la curva de SEV es necesario construir gráficamente el ábaco de curvas de tres capas de SEV para el valor dado μ_1 . Esto, como vimos, no presenta dificultades.

Errores de interpretación en función de los errores en la valoración de h_1 y ρ . Interpretación con ayuda del ábaco de dos capas.

El estudio de las curvas calculadas de SEV de tres capas de tipo H demuestra que en el caso de relación h_2/h_1 grande es admisible menospreciar la capa superior e interpretar las curvas con ayuda del ábaco de dos capas, es decir, no tomar en consideración la rama izquierda (descendente) de la gráfica, considerando para la superposición con el ábaco sólo el mínimo y la rama derecha (ascendente) de la curva de SEV (fig. 133). Para tal método de interpretación se superpone la curva de SEV al ábaco de dos capas de forma que su mínimo sea tangente a la rama inicial de las curvas de dos capas. A continuación y conservando el paralelismo de los ejes de las gráficas se traslada a la derecha y hacia arriba; para ello se debe deslizar el mínimo de la curva de SEV que se interpreta desde el principio de la parte ascendente de las curvas de SEV de dos capas ($\rho_2 = \infty$), sin que la corte. La lectura del valor de la profundidad H del horizonte de apoyo se realiza cuando la rama derecha de la curva de SEV tiene todos sus puntos en coincidencia con la rama ascendente de la curva de dos capas.

Fig. 133.— Ejemplo de interpretación de la curva de SEV de tipo H con ayuda del ábaco de dos capas;
 1.—Posición inicial de la curva de SEV en la interpretación;
 2.—Posición final;
 3.—Curva de dos capas del ábaco.



En la tabla 28 se tienen estos valores mínimos de h_2/h_1 , del corte para ρ_2/ρ_1 dados, con $\rho_3 = \infty$, comenzando por los cuales es factible interpretar las curvas de SEV de tres capas de tipo H con ayuda del ábaco de dos capas.

Para poder estimar el valor del error en la interpretación, en función de la exactitud de cálculo de h_1 y ρ_1 , hallamos la

expresión general de este error en función de los parámetros del corte h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 , para $\rho_3 = \infty$. En este caso, como sabemos, es $S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2$.

TABLA 28

VALORES MINIMOS DE h_2/h_1 , A PARTIR DE LOS CUALES ES ADMISIBLE LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV DE TRES CAPAS DE TIPO H ($\rho_3 = \infty$) CON AYUDA DEL ABACO DE DOS CAPAS Y EXACTITUD DEL 10%

Valor inicial de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Valor de h_2/h_1	Valor inicial de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Valor de h_2/h_1
1/300	15	1/9	5
1/100	9	1/4	4
1/39	5	2/3	3
1/19	5		

Suponiendo en la interpretación de la curva de SEV un error en el cálculo de h_1 , en uno u otro sentido, de $m\%$ de su verdadero valor y un error en el cálculo de ρ_1 de $n\%$ de su verdadero valor, es decir, que tengamos en lugar del valor real de h_1 y ρ_1 otros $K_1 h_1$ y $K_2 \rho_1$, siendo K_1 y K_2 coeficientes de error menores o mayores que la unidad relacionados con m y n por las relaciones:

$$K_1 = 1 + m/100 \quad K_2 = 1 + n/100,$$

entonces la expresión que fija S , será:

$$S = K_1 \cdot h_1 / K_2 \cdot \rho_1 + h'_2 / \rho_2 \quad (27)$$

en la que h'_2 es el espesor de la segunda capa obtenido en la interpretación con cierta equivocación a causa del error en el cálculo de h_1 y ρ_1 .

En la fórmula (27) se observa

$$h'_2 = h_2 + h_1 \cdot (\rho_2/\rho_1) (1 - K_1/K_2)$$

Los errores absoluto y relativo en el cálculo de h_2 serán, respectivamente:

$$\Delta h_2 = h'_2 - h_2 = h_1 \cdot \rho_2 / (K_2 \rho_1) (K_2 - K_1) \quad (28)$$

$$(\Delta h_2 / h_2) \cdot 100 = (h_1 / h_2) \cdot (\rho_2 / K_2 \cdot \rho_1) \cdot (n - m)\% \quad (29)$$

Los errores en la valoración de la profundidad del horizonte de apoyo H vienen dados por:

$$\Delta H = K_1 \cdot h_1 - h_1 + \Delta h_2 = h_1 [K_1 - 1 + (\rho_2 / K_2 \cdot \rho_1) \cdot (K_2 - K_1)] \quad (30)$$

$$(\Delta H / H) \cdot 100 = \frac{m + (\rho_2 / K_2 \rho_1) (n - m)}{1 + h_2 / h_1} \% \quad (31)$$

La fórmula (31) demuestra que el error relativo de interpretación será mayor en el caso de que los errores en el cálculo de h_1 y ρ_1 tengan distinto signo: para este caso el error depende de la suma de los errores. El error mínimo de interpretación se tiene para el caso en que los errores en el cálculo de h_1 y ρ_1 tengan igual valor y signo; en dicho caso el error depende sólo del error cometido en la evaluación de h_1 .

Si sólo se comete error al calcular h_1 , entonces la fórmula (31) se reduce a,

$$\Delta H/H = m(1 - \rho_2/\rho_1)/(1 + h_2/h_1)\% \quad (32)$$

Si por el contrario sólo se tiene error en el valor de ρ_1 ,

$$\Delta H/H = (n \cdot \rho_2 / K_2 \cdot \rho_1) / (1 + h_2/h_1) \quad (33)$$

Dado que el corte de tipo H es siempre $\rho_2/\rho_1 < 1$, $\Delta H/H$ tendrá en ambos casos el mismo signo que el error cometido en la valoración de h_1 y ρ_1 .

Errores de interpretación en función de los errores en la valoración de ρ_2 .

Supongamos que en la interpretación de las curvas de SEV de tipo H se tiene un cierto error en la valoración de ρ_2 . Sea el valor absoluto de este error $p\%$ del valor verdadero de ρ_2 , es decir, en lugar de ρ_2 tomamos un cierto valor $K_3 \cdot \rho_2$, siendo $K_3 = 1 + p/100$. Suponiendo que h_1 , ρ_1 y S se han calculado exactamente, se halla fácilmente, de modo análogo al caso anterior,

$$\Delta h_2 = h_2(K_3 - 1) \quad (34)$$

$$(\Delta h_2/h_2) \cdot 100 = p\% \quad (35)$$

$$\Delta H = h_2(K_3 - 1) \quad (36)$$

$$(\Delta H/H) \cdot 100 = (h_2/h_1) \cdot p / (1 + h_2/h_1)\% \quad (37)$$

El error relativo de h_2 es, en este caso, igual al error relativo de ρ_2 . Esto era de esperar a causa del principio de equivalencia en S .

Errores de interpretación en función de los errores en la valoración de S .

Si en la interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H se tiene un error de $q\%$ en la valoración de la conductancia longitudinal total S , es decir, se toma en la gráfica de SEV en lugar de S un valor $K_4 \cdot S$, siendo $K_4 = 1 + q/100$, entonces, supuesto un cálculo suficientemente exacto de los restantes parámetros, se tendrá un error en la valoración del espesor de la segunda capa y en lugar de h_2 obtendremos un valor $h'_2 = h_2 + \Delta h_2$, en que Δh_2 puede tener cualquier signo.

De aquí, en los resultados de la interpretación tendríamos,

$$K_4 \cdot S = h_1/\rho_1 + h'_2/\rho_2$$

de donde

$$h_2' = (K_4 \cdot S - h_1/\rho_1) \cdot \rho_2 = h_1/\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (K_4 - 1) + K_4 \cdot h_2$$

$$\Delta h_2 = h_2' - h_2 = (K_4 - 1) \cdot (h_1 \rho_2/\rho_1 + h_2) \quad (38)$$

El error absoluto en la interpretación será, por tanto:
 $\Delta H = \Delta h_2$. El error relativo:

$$(\Delta H/H) \cdot 100 = \frac{q \cdot (\rho_2/\rho_1 + h_2/h_1)}{1 + h_2/h_1} \% \quad (39)$$

En esta expresión se observa que el error en el cálculo de H es proporcional al error en la valoración de S, tiene también su mismo signo y crece al crecer h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . Se ve fácilmente que el error en este caso de corte de tipo H es siempre menor que el error en el cálculo de S, si los parámetros h_1 , ρ_1 , ρ_2 del corte se han calculado exactamente.

Al crecer h_2/h_1 , el error se aproxima al error en la evaluación de S.

Expresión del error total de interpretación

Supongamos que en la interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H ($\rho_3 = \infty$) se introducen errores en el cálculo de todos los parámetros h_1 , ρ_1 , ρ_2 y S. Igualmente que en el caso anterior, se puede obtener la expresión del error total de interpretación, teniendo presente lo expuesto y designando los errores relativos así: m, para h_1 , n para ρ_1 , p para ρ_2 y q para S, con los correspondientes coeficientes de error K_1 , K_2 , K_3 y K_4 .

$$(\Delta h_2/h_2) \cdot 100 = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{K_3 \rho_2}{K_2 \rho_1} \cdot (n - m + q + 0,01 \cdot q \cdot n) + (p + q + 0,01 pq) \% \quad (40)$$

$$(\Delta H/H) \cdot 100 = \frac{m + \frac{K_3 \rho_2}{K_2 \rho_1} (n - m + q + 0,01 qn) + \frac{h_2}{h_1} (p + q + 0,01 pq)}{1 + h_2/h_1} \% \quad (41)$$

Veamos un ejemplo de aplicaciones de estas fórmulas. Supongamos que en la interpretación de una curva perteneciente a un corte de tipo H tengamos $\rho_2/\rho_1 = 1/4$, $h_2/h_1 = 3$ y $\rho_3 = \infty$, y los errores son:

En el cálculo de h_1 $m = + 150\%$; $K_1 = 1,5$
 En el cálculo de ρ_1 $n = - 60\%$; $K_2 = 0,4$
 En el cálculo de ρ_2 $p = + 20\%$; $K_3 = 1,2$
 En el cálculo de S $q = + 10\%$; $K_4 = 1,1$

Por la fórmula (41) tendremos:

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{150 + 0,75(-210 + 10 - 6) + 3(30 + 2)}{4} \approx + 23\%$$

Tal sería el error relativo en la profundidad del horizonte de apoyo en el caso dado. Si el error en el cálculo de ρ_2 fuera de

signo opuesto al del error de S , por ejemplo, fuera $p = -20\%$ ($K_3 = 0,8$), entonces el error total sería mucho menor:

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{150 + 0,5(-210 + 10 - 6) + 3(-10 + 2)}{4} \approx +6\%$$

Errores en la interpretación de curvas de SEV de tipo H, con aspecto de curvas de dos capas

Si la capa intermedia del corte de tres capas de tipo H tiene un espesor relativamente pequeño o se diferencia poco en lo que respecta a la resistividad de la capa superior, entonces, ella, como dijimos anteriormente, no se refleja en la curva de SEV y ésta sólo puede interpretarse como si fuera de dos capas. En la figura 78 se tiene un gráfico indicando el valor mínimo de h_2/h_1 para el que la capa intermedia empieza a señalarse en la curva de SEV. Estos espesores relativos son muy pequeños para valores pequeños de ρ_2/ρ_1 y crecen fuertemente al crecer ρ_2/ρ_1 . Por ejemplo, si $\rho_2/\rho_1 = 2/3$, entonces incluso para $h_2/h_1 = 1$ el SEV de tres capas puede tomarse como si fuera de dos capas.

Esta interpretación de las curvas de tres capas conduce con frecuencia a errores de interpretación. En efecto, la interpretación de la curva de SEV de tres capas como si fuera de dos capas lleva a la expresión $h'_1 = S \cdot \rho_1$, siendo h'_1 el valor erróneo de la profundidad del horizonte de apoyo que, en realidad, es igual a $H = h_1 + h_2$. Expresando S por los parámetros del corte tenemos,

$$h'_1 = h_1 + h_2 \cdot \rho_1/\rho_2$$

De aquí se deducen los errores absolutos y relativos:

$$\Delta H = h'_1 - H = h_2(\rho_1/\rho_2 - 1) \quad (42)$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{\frac{h_2}{h_1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)}{1 + h_2/h_1} \% \quad (43)$$

En estas expresiones se ve que el error de interpretación, en el caso considerado, tiene signo positivo, porque ρ_1/ρ_2 , en el corte de tipo H siempre es mayor que la unidad. Este error crece mucho al aumentar h_2/h_1 y disminuir ρ_2/ρ_1 (fig. 134). De aquí se deduce que en la interpretación de curvas de SEV de tres capas con aspecto parecido a las de dos capas hay que actuar con gran precaución, si no se quiere caer en errores de consideración. Como ejemplo citemos una curva de SEV (fig. 135) que refleja un corte de tres capas en el que la primera es de arenas con espesor de 100 m y resistividad de unos 200 ohm.m, la segunda de arcillas con espesor de unos 10 m y resistividad de 20 ohm.m y la tercera de sedimentos halógenos de resistividad infinitamente grande. La curva de SEV aparenta ser de dos capas. Si se interpreta con ayuda del ábaco de dos capas se obtiene $H = 200$ m. El error de interpretación es, por tanto, de 90 m.

Fig. 134.—Errores al interpretar curvas de SEV de tres capas de tipo H, con la capa intermedia expresada confusamente, como de dos capas.

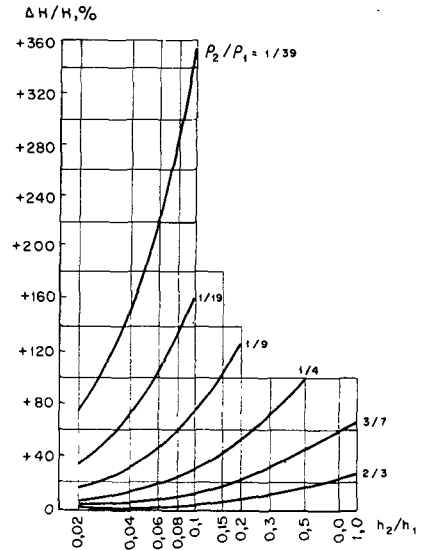
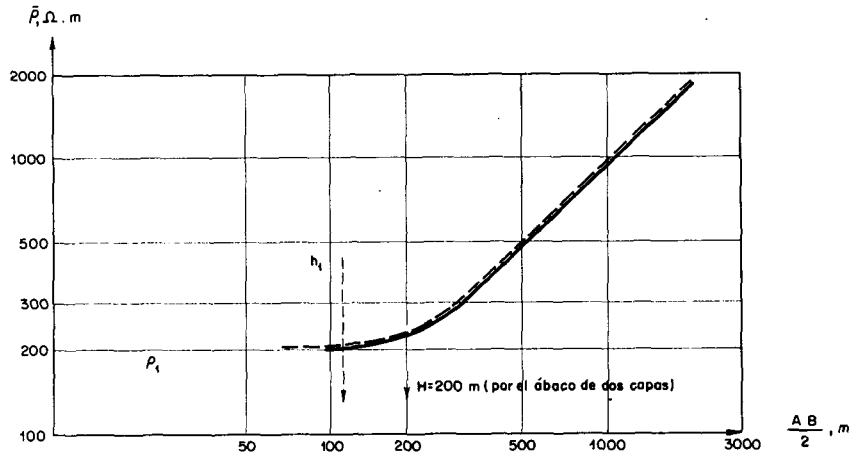


Fig. 135.—Ejemplo de interpretación de curvas de SEV de tres capas de tipo H ($\rho_3 = \infty$) como si fuera de dos capas. Corte eléctrico verdadero. $h_1 = 100, h_2 = 10, h_3 = \infty; \rho_1 = 200, \rho_2 = 20, \rho_3 = \infty.$



21.2. Interpretación por los valores S , ρ_2 y ρ_1

Para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tres capas, en caso de $\rho_3 = \infty$, con frecuencia no se recurre a los ábacos de tres capas y sólo se utilizan los valores S sacados directamente de los impresos de las curvas de SEV y del conocimiento previo de ρ_2 o ρ_1 .

Como siempre, se calcula en la curva de SEV, h_1 y ρ_1 con ayuda del ábaco de dos capas. Se calcula la conductancia longitudinal de la primera capa: $S_1 = h_1 / \rho_1$. A continuación, tomando de la gráfica de SEV el valor de la conductancia total S de ambas capas, se fija la conductancia longitudinal de la segunda, $S_2 = S - S_1$.

Como $S_2 = h_2 / \rho_2$, al conocer ρ_2 , se puede deducir $h_2 = S_2 \cdot \rho_2$.

De ello se deduce la profundidad del horizonte de apoyo,

$$H = h_1 + S_2 \cdot \rho_2$$

Los errores de interpretación, siguiente a este método, dependen principalmente de la exactitud en el cálculo de S y ρ_2 . Se expresan por las fórmulas (36) y (38).

El error total, en función del error en el cálculo de S y ρ_2 , se obtiene fácilmente de la expresión (41):

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{\frac{K_3 \rho_2}{\rho_1} q + \frac{h_2}{h_1} (q + p + 0,01 pq)}{1 + h_2/h_1} \% \quad (44)$$

en que K_3 es el coeficiente de error en la evaluación de ρ_2 , p el error en el cálculo de ρ_2 en % y q el error en el cálculo de S en %.

A causa de que S_1 en el corte de tipo H , especialmente para h_2/h_1 grande y ρ_2/ρ_1 pequeño, influye de modo insignificante en el valor de S , se puede despreciar en el cálculo de h_2 la magnitud S_1 y calcular el espesor de la segunda capa como $h_2 = S \cdot \rho_2$, sin que ello suponga error apreciable, de donde $H = h_1 + S \cdot \rho_2$.

A menudo, cuando no se puede calcular el valor del parámetro ρ_2 , pero se conoce ρ_l , resistividad media longitudinal de la primera y segunda capa, la interpretación de la curva de SEV para $\rho_3 = \infty$, se realiza utilizando la expresión ya conocida, $H = S \cdot \rho_l$. El error en este caso depende del error en el cálculo de S y ρ_l .

Teniendo presente que, en ciertos casos, ρ_l varía muy poco al variar los parámetros del corte, se supone con frecuencia la resistividad longitudinal media constante en grandes extensiones del terreno investigado.

Si el valor ρ_l varía dentro de la superficie estudiada entre límites pequeños (hasta ± 10 a 15%) entonces se puede tomar una magnitud intermedia ρ_l^0 de este valor como resistividad media longitudinal constante del terreno en la zona y partiendo de ella calcular la profundidad del horizonte de apoyo ($H = S \cdot \rho_l^0$). Se ve fácilmente que con tal interpretación el relieve de la superficie del horizonte de apoyo es más acentuado si en el corte, ρ_2 permanece constante y la variación de ρ_l y de la profundidad del horizonte de apoyo está vinculada principalmente con la variación de la capa conductora.

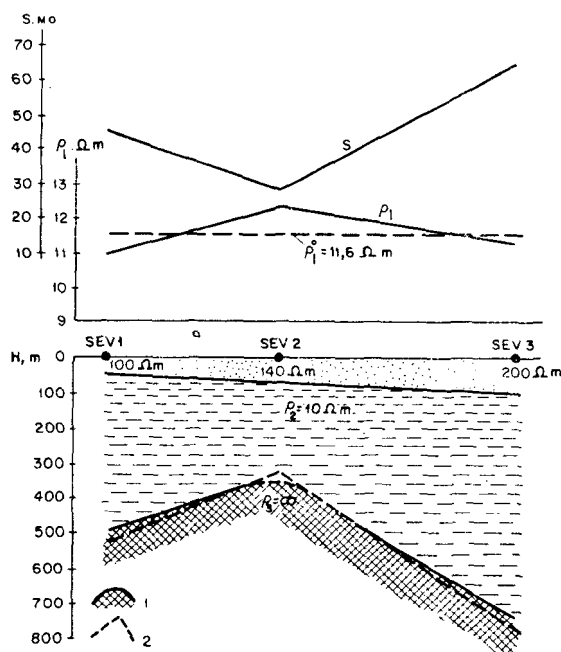
Veamos un ejemplo. Sea el relieve de la superficie del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$) en los puntos de SEV 1, 2 y 3, el indicado en la figura 136, al mismo tiempo que

	h_1 (m)	ρ_1 (ohm.m)	h_2 (m)	ρ_2 (ohm.)	S	ρ_l (ohm.m)
En punto de SEV 1	50	100	450	10	45,5	11,0
En punto de SEV 2	70	140	280	10	28,5	12,3
En punto de SEV 3	100	200	650	10	65,5	11,4

Según esto, el verdadero valor de ρ_l oscila entre 11 y 12 ohm.m. La media es $\rho_l = 11,6$ ohm.m. Tomando este valor como inicial para la interpretación de las curvas de SEV, obtenemos el relieve de la superficie del horizonte de apoyo

representada en la figura 136 de trazo punteado. La interpretación cuantitativa conduce, como vemos, a un descenso mayor de los flancos que el existente en la realidad.

Fig. 136.—
Acentuación del relieve de la superficie del horizonte de apoyo en la interpretación de las curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$).
1.—Posición real de la superficie del horizonte de apoyo;
2.—Superficie del horizonte de apoyo según los resultados de la interpretación.



Si en el terreno explorado varía el parámetro ρ_2 , entonces el intervalo de variación de la profundidad del horizonte de apoyo obtenido para la interpretación de las curvas de SEV por S y ρ_1^0 puede estar en proporción diversa con las amplitudes verdaderas. En este caso, naturalmente no se puede hablar de un acentuamiento del relieve del horizonte de apoyo.

21.3. Interpretación con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov

También es posible una interpretación simple de las curvas de SEV no equivalentes, siendo ρ_2 desconocido, con ayuda de los ábacos. Pero para ello es necesario ante todo asegurarse

Este método, para el caso de corte de tres capas en el que no es aplicable el principio de equivalencia, permite realizar la interpretación de las curvas de SEV sin conocimiento previo del parámetro ρ_2 . Da, como vimos, la posibilidad de calcular simultáneamente h_2 y ρ_2 .

También es posible una interpretación simple de las curvas de SEV no equivalentes, siendo ρ_2 desconocido, con ayuda de los ábacos. Pero para ello es necesario ante todo asegurarse de que efectivamente se trata de curvas no equivalentes. Los nomogramas indicados aclaran directamente la cuestión de la equivalencia. Además, se excluye la necesidad de tener que manejar gran cantidad de ábacos entre los que buscar la curva calculada de SEV que mejor coincida con la práctica. Por ello, para la interpretación de las curvas de SEV que

corresponden realmente a un corte de tres capas, es recomendable la utilización de los nomogramas. Ello no debe excluir, sin embargo, la prueba de cálculo del parámetro ρ_2 y de la profundidad del horizonte de apoyo por los otros métodos posibles, para el debido control de los resultados.

Los métodos de interpretación expuestos permiten calcular con suficiente exactitud práctica la profundidad del horizonte de apoyo, si se ha valorado exactamente la resistividad ρ_2 de la capa conductora o la resistividad media longitudinal ρ_l del conjunto de las capas que yacen sobre el horizonte de apoyo. Existen también otros métodos de interpretación de las curvas de SEV que no van ligados al cálculo de los parámetros. Se utilizan habitualmente en una valoración grosera de la variación de las profundidades. No pretendiendo la exactitud de los resultados cuantitativos, estos métodos dan, en algunas circunstancias, una idea relativamente fiel de la marcha de la superficie del horizonte estudiado.

Examinemos estos métodos utilizados en la interpretación de las curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$).

21.4. Interpretación por puntos de separación de la curva de SEV

Este método aproximado de interpretación fue propuesto por G. D. Tsekov en el año 1943 y se aplicó en su día bastante para el tratamiento del material de SEV en el Preural bashkirio, donde el horizonte de apoyo presenta rocas de resistividad infinitamente grande. El método está basado en el estudio de la posición del punto en que la rama final derecha de la curva de SEV se despega de su asíntota (fig. 137). Para las curvas de SEV de dos capas la abscisa x de este punto de separación es aproximadamente igual al doble de la profundidad H del horizonte de apoyo.

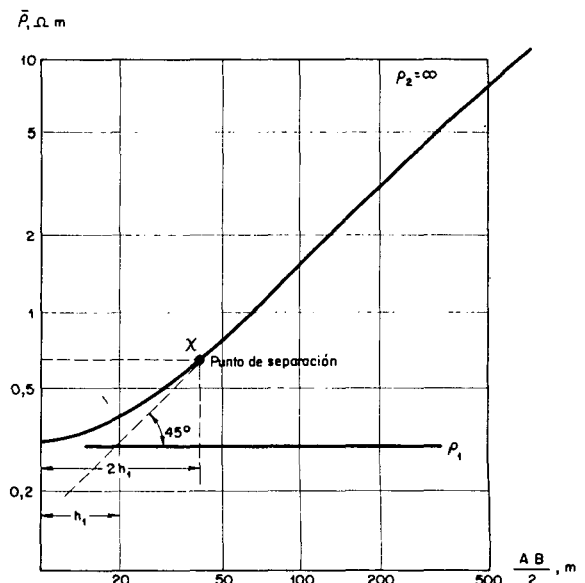


Fig. 137.— Interpretación de curvas de SEV de dos capas por el punto de separación.

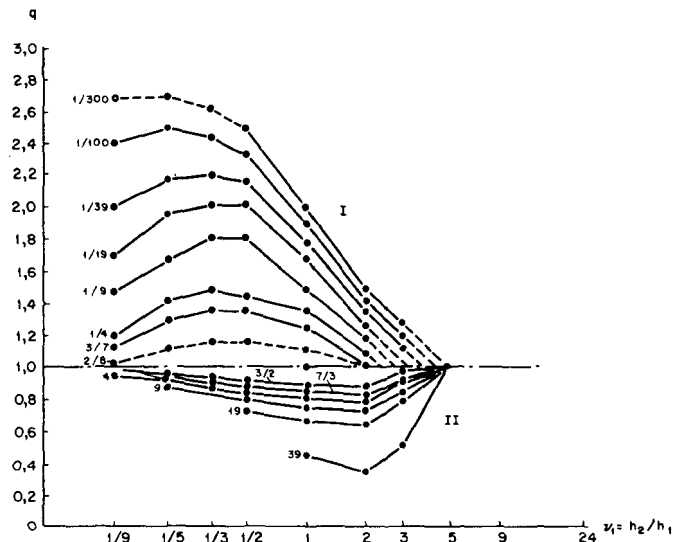
En el caso de corte de tres capas de tipo H la profundidad del horizonte de apoyo está relacionada con la abcisa del punto de separación de la curva de SEV del modo siguiente:

$$H = x/2q, \quad (45)$$

siendo q un coeficiente que depende de $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\nu_1 = h_2/h_1$, que en el caso general de corte de tipo H es mayor que la unidad.

Utilizando los ábacos de las curvas de SEV de tres capas de tipo H se puede calcular fácilmente este coeficiente (fig. 138, I). El gráfico citado señala que q crece bastante al disminuir μ_1 . Para $\nu_1 \geq 5$ el coeficiente q se hace igual a la unidad, para cualquier μ_1 hasta $1/300$. Cuanto mayor es μ_1 , tanto menor es el valor ν_1 para el que q se diferencia poco de la unidad.

Fig. 138.—
Dependencia del
coeficiente
 $q = x/2H$ de los
parámetros del
corte en los tipos
 H y A (según
G. D. Tsekov).
I.—Curvas de SEV
de tipo H ($\rho_3 = \infty$);
II.—Curvas de
SEV de tipo A
($\rho_3 = \infty$).



En caso de que el espesor de la segunda capa, en el corte de tipo H para $\mu_1 \geq 1/19$, sea igual o mayor que el triple del espesor de la primera capa, se puede calcular la profundidad del horizonte de apoyo con suficiente exactitud tomando la mitad del valor de la abcisa del punto de separación de la curva de SEV. Para una relación h_2/h_1 menor, este método de interpretación conduce a una profundidad H exagerada, tanto mayor cuanto menor sea h_2/h_1 .

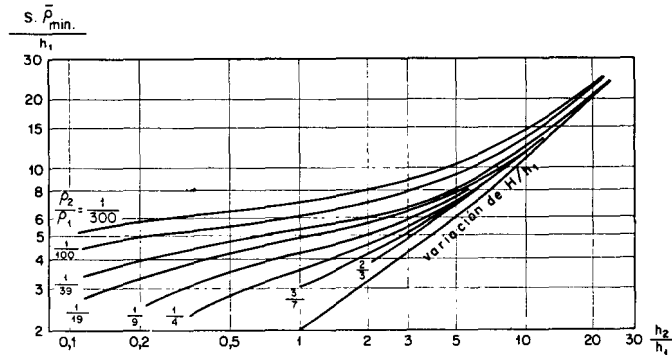
21.5. Interpretación por los valores S y $\bar{\rho}_{min}$

Uno de los métodos aproximados de interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H ($\rho_3 = \infty$) consiste en el cálculo del producto de la conductancia longitudinal total S por el valor de $\bar{\rho}_{min}$.

La profundidad del horizonte de apoyo en el punto dado de SEV es $H = S \cdot \rho_l$, siendo ρ_l la resistividad media longitudinal del corte. La variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{min}$ en la curva de SEV de tipo H refleja de algún modo la

variación de ρ_1 del corte; para éste, el valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ siempre excede a la magnitud ρ_1 (figs. 106 y 107). Por ello, la variación del producto $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ caracteriza hasta cierto punto la profundidad del horizonte de apoyo. El producto $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ es siempre mayor que la magnitud H . Y sólo para valores de h_2/h_1 o ρ_2/ρ_1 muy próximos al valor unidad es cuando $\bar{\rho}_{min}$ se aproxima al valor ρ_1 (fig. 139) y $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ se diferencia poco de h .

Fig. 139.—
Variación de $S \cdot \bar{\rho}_{min}/h_1$ en función de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 .



Así pues, suponiendo para una evaluación aproximada de la profundidad del horizonte de apoyo, $H = S \cdot \bar{\rho}_{min}$, ello equivale a una exageración en el valor de H proporcional a la relación entre $\bar{\rho}_{min}$ y ρ_1 . La relación $N = \bar{\rho}_{min}/\rho_1$, como indica la figura 106, no permanece constante. Comenzando aproximadamente por $h_2/h_1 = 0,5$ esta relación, permaneciendo los demás parámetros constantes, disminuye al aumentar h_2/h_1 . De ello se deduce que, mediante el método indicado de interpretación, al atenuarse el relieve de la superficie de apoyo disminuyen las variaciones de las formas estructurales.

A veces, en la práctica, se valoran los límites posibles de variación de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 en toda la zona investigada y se calcula un cierto coeficiente medio N_m que se introduce en la expresión de la evaluación de H en función de S y $\bar{\rho}_{min}$:

$$H = S \cdot \bar{\rho}_{min} / N_m$$

Se ve fácilmente que la profundidad del horizonte de apoyo queda acentuada en los puntos de SEV en que el mismo yace a poca profundidad y disminuida en los puntos de hundimiento. Por tanto, al introducir el coeficiente N_m los resultados de la interpretación de las curvas de SEV mediante S y $\bar{\rho}_{min}$ suavizan aún más el relieve de la superficie del horizonte de apoyo. Confirmemos esto con un ejemplo práctico.

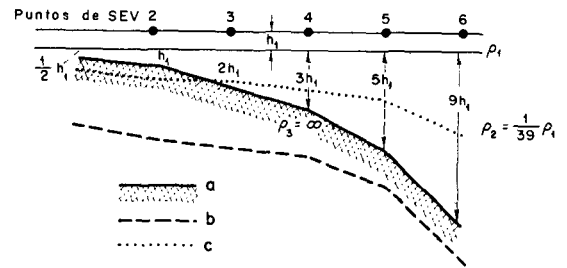
El corte de la figura 140 por los SEV 1 — 6, corresponde al caso $\rho_1 = \text{cte}$, $h_1 = \text{cte}$, $\rho_2 = (1/39)\rho_1$; h_2 crece de $(1/2)h_1$ (SEV 1) a $9h_1$ (SEV 6).

Al calcular en cada punto de SEV el valor $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ obtenemos en el corte un valor de la superficie del horizonte de apoyo más profunda y abrupta que la realidad. La amplitud del

plegamiento es, en lugar de $8,5 h_1$, de $6 h_1$, según los resultados de la interpretación.

Aún una amplitud menor se obtendrá si se introduce el coeficiente N_m . En nuestro caso es igual a la media aritmética del valor de N para $h_2 = (1/2) h_1$ y $h_2 = 9 h_1$. La interpretación utilizando el coeficiente N_m da una subida del horizonte de apoyo con una amplitud total de $3 h_1$. Los resultados de la interpretación de los SEV dan en este caso, como vemos, una idea muy alterada de la marcha de la superficie del horizonte.

Fig. 140.—
Alteración de la profundidad del horizonte de apoyo al interpretar las curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$) por el método de S y $\bar{\rho}_{min}$.
a.—Posición verdadera de la superficie del horizonte de apoyo;
b.—Posición del horizonte de apoyo al calcular su profundidad mediante la fórmula $H = S$.
c.—Idem. al calcularla por la fórmula $H = S \cdot \bar{\rho}_{min} / N_m$.

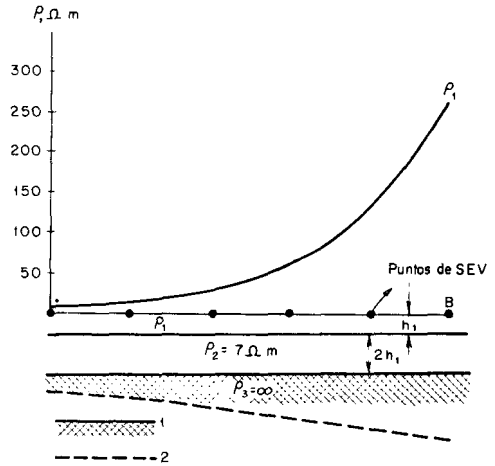


Es decir, que la interpretación de las curvas de SEV por S y $\bar{\rho}_{min}$, aún en el caso de h_1 , ρ_1 y ρ_2 constantes, conduce a una imagen alterada sobre la configuración del horizonte de apoyo, en especial para el caso de relieves acentuados.

Si, para una profundidad constante del horizonte de apoyo, se hace variar la resistividad de la segunda capa, entonces la relación $\bar{\rho}_{min} / \rho_1$ aumenta al disminuir ρ_2 (fig. 107). Por ello, supuesta la profundidad como $H = S \cdot \bar{\rho}_{min}$, en el caso indicado exageramos la misma en las parcelas en que disminuye ρ_2 y la suavizamos en las parcelas en que aumenta ρ_2 . En relación con esto, puede formarse una idea de la escasa importancia de los plegamientos y flexiones del horizonte de apoyo. Esto mismo se aprecia también por los resultados de la interpretación de las curvas de SEV por S y $\bar{\rho}_{min}$ para el caso de ρ_1 y h_1 variables.

Sea, por ejemplo, el perfil de SEV (fig. 141) en el que sólo varía ρ_1 , de 10 a 260 ohm.m, de Oeste a Este, permaneciendo $\rho_2 = cte = 7$ ohm.m; $h_1 = cte$; $h_2 = cte = 2 h_1$. La profundidad del horizonte de apoyo será, por tanto, constante. Interpretando

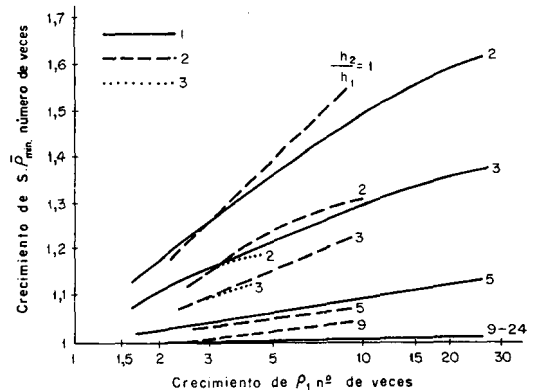
Fig. 141.—
Comportamiento
del horizonte
de apoyo al
interpretar las
curvas de SEV
de tipo H
($\rho_3 = \infty$)
mediante la
fórmula $H = S \cdot \bar{\rho}_{min}$
 $\bar{\rho}_{min}$ en caso de ρ_1
variable.
1.—Situación
verdadera de la
superficie del
horizonte de
apoyo;
2.—Idem.
según los
resultados de la
interpretación.



las curvas de SEV por los valores S y $\bar{\rho}_{min}$ se llega a una idea falsa de la existencia de un descenso del horizonte de apoyo de Oeste a Este (línea de puntos) y en la dirección de aumento de ρ_1 .

El aumento del valor de $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ al crecer ρ_1 es grande, sobre todo, para h_2/h_1 pequeño y ρ_2/ρ_1 grande (fig. 142).

Fig. 142.—
Crecimiento de
 $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ en función
del crecimiento de
 ρ_1 , al permanecer
constantes los
restantes
parámetros del
corte ($\rho_3 = \infty$).
1.— $\rho_2/\rho_1 = 2/3$;
2.— $\rho_2/\rho_1 = 1/4$;
3.— $\rho_2/\rho_1 = 1/9$.

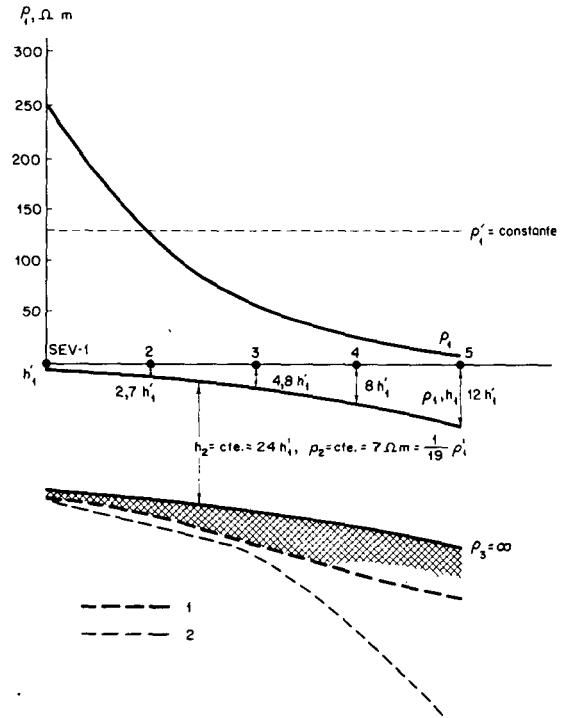


Si en el corte sólo varía h_1 entonces obtenemos mediante el uso de la fórmula $H = S \cdot \bar{\rho}_{min}$, al calcular la profundidad del horizonte de apoyo, un valor bastante exagerado respecto al verdadero, en aquellas zonas en que h_1 aumenta mucho.

La variación simultánea de h_1 y ρ_1 con el mismo signo conduce a una alteración aún más fuerte de la profundidad del horizonte de apoyo que la variación aislada de cualquiera de estos parámetros. La variación de h_1 y ρ_1 en sentidos opuestos (fig. 143), conduce a una disminución de la desviación del valor $S \cdot \bar{\rho}_{min}$ respecto al valor verdadero de H .

De lo expuesto se desprende que el método de interpretación de las curvas de SEV por S y $\bar{\rho}_{min}$ debe usarse con gran prudencia y sólo para tener una idea aproximada de la variación relativa de la profundidad del horizonte de apoyo.

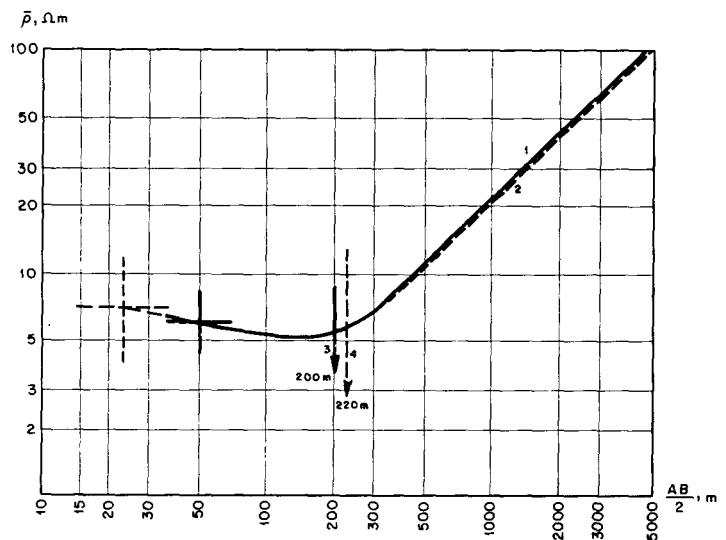
Fig. 143.—
Comportamiento
del horizonte de
apoyo al
interpretar las
curvas de SEV
de tipo H
($\rho_3 = \infty$) mediante
la fórmula $H = S$.
 $\bar{\rho}_{min}$ para el caso
de h , y ρ_1
variables (1) y de
sólo variable h , (2).



21.6. Interpretación por el método de comparación con curvas de SEV experimentales

En la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV se recurre con frecuencia a su comparación con una o varias curvas prácticas en las que la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo se ha calculado con suficiente seguridad. Tales curvas de SEV se designan como curvas calibradas. Habitualmente se comparan las curvas de campo en función de su aspecto con las paramétricas. Mediante la superposición

Fig. 144.—
Interpretación
de curva de SEV
de tipo H
mediante su
comparación con
curva calibrada
de SEV.
1.—Curva de SEV
que hay que
interpretar
($\mu_1 = 2/3$; $\nu_1 = 3$).
2.—Curva
calibrada de SEV
($\mu_1 = 2/3$; $\nu_1 = 9$).
3.—Profundidad
verdadera
del horizonte
de apoyo;
4.—Profundidad H
del horizonte de
apoyo obtenida
con ayuda de la
curva calibrada.
Error de
interpretación
 $\Delta H/H = 10\%$.

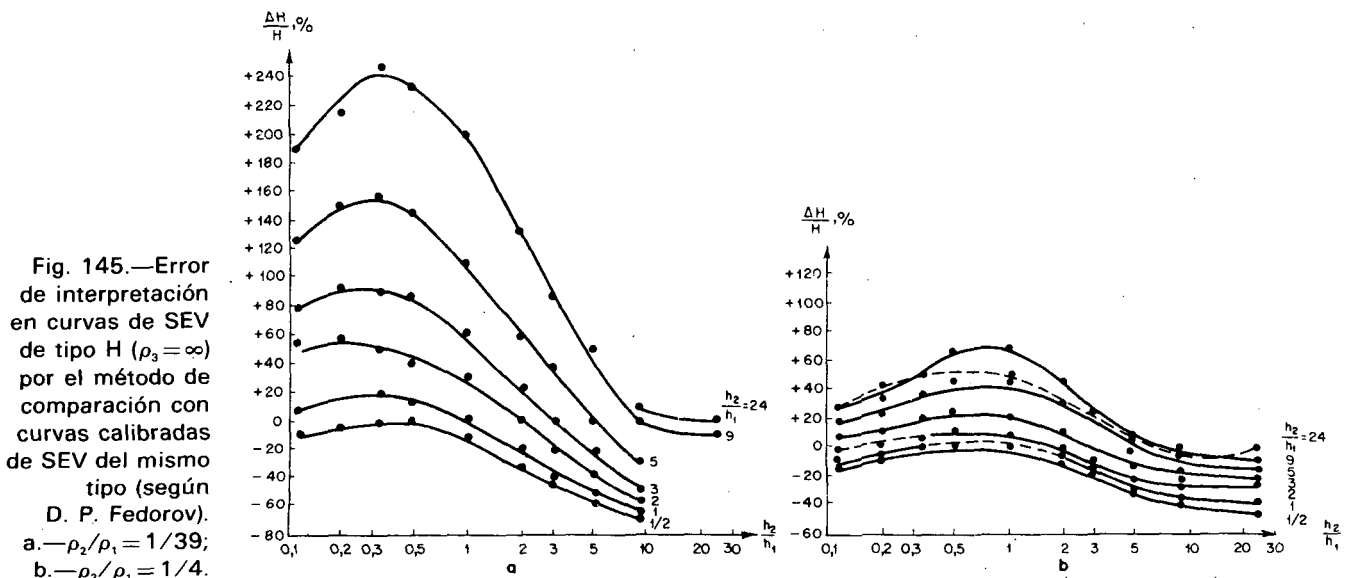


directa de las curvas que se interpretan con las paramétricas se procura una coincidencia óptima de la parte media y final de ambas curvas conservando siempre el paralelismo riguroso de sus ejes coordenados. Conseguida tal coincidencia se lleva la marca de profundidad de la curva de SEV paramétrica a la que se interpreta (fig. 144).

Este método es sencillo, pero lleva en sí motivo de grandes errores. Veamos los resultados de la investigación de semejantes errores, realizada por D. P. Fedorov. El análisis de las curvas calculadas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$) pone de manifiesto que sólo se pueden conseguir resultados satisfactorios en la interpretación (error hasta $\pm 10\%$) por este método, con la condición de que ρ_2/ρ_1 sea constante en todo el terreno investigado, en el caso de que dicha relación se diferencia poco de la unidad, por ejemplo, $\rho_2/\rho_1 = 2/3$. Cualquiera que sea la cota de H , profundidad del horizonte de apoyo, para la curva de SEV calibrada en este caso, la interpretación de las restantes por comparación con ellas, aún para límites de variación de H bastante amplios, no debe causar errores que excedan de $\pm 10\%$. Los límites admisibles de variación de h_2/h_1 para tal grado de exactitud en la interpretación varían en relación con el valor h_2/h_1 en la correspondiente curva de SEV que sirve de referencia. Si por ejemplo $\nu_1 = 0,5$ ó 1 , entonces, en los puntos de SEV que se interpretan h_2/h_1 puede variar aproximadamente entre los límites $0,1$ a 20 . Si para la curva calibrada $\nu_1 \approx 2$ a 3 , entonces los límites de variación admisibles de h_2/h_1 en los SEV que se interpretan deben estar entre $0,1$ y 9 ; para $\nu_1 = 5$ y más, los límites de variación de h_2/h_1 suben a 24 y más y así sucesivamente.

Al disminuir ρ_2/ρ_1 los límites de variación admisible de h_2/h_1 para los que es posible una interpretación satisfactoria por el método de comparación se reducen (tabla 29).

La tabla 29 demuestra que si, por ejemplo, en el terreno de la exploración ρ_2/ρ_1 oscila entre $1/39$ y $1/9$ y en la curva de SEV calibrada es $\nu_1 \approx 2$, entonces la interpretación por el



método de comparación sólo es admisible, con una exactitud aceptable con la condición de que la variación de h_2/h_1 en los puntos de SEV que se interpretan varíe entre 1,5 y 2,5. Para límites más amplios de variación de h_2/h_1 , el error de interpretación aumenta.

En la figura 145 y a modo de ejemplo, se dan las gráficas de la variación de los errores de interpretación por el método de comparación con curvas de SEV calibradas para $\rho_2/\rho_1 = 1/39$ y $1/4$ en función de h_2/h_1 , en el punto de SEV cuya curva se interpreta y de los valores h_2/h_1 correspondientes a la curva de SEV calibrada. Estos últimos están indicados junto a cada una de las gráficas. Por ejemplo, el error de interpretación de la curva de SEV para $\mu_1 = 1/4$, $\nu_1 = 2$, mediante su comparación con la curva de SEV calibrada que corresponde a $\nu_1 = 9$ para el mismo $\mu_1 = 1/4$, lo hallamos como la ordenada del punto de corte de la recta $h_2/h_1 = 2$ con la gráfica junto a la cual está indicado $\nu_1 = 9$ ($\Delta H/H$) $\cdot 100 = +57\%$.

TABLA 29

LIMITES ADMISIBLES DE VARIACION DE h_2/h_1 EN EL CORTE DE TRES CAPAS DE TIPO H ($\rho_3 = \infty$; $\rho_2/\rho_1 = \text{cte.}$) PARA LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV CON EXACTITUD NO MENOR DE 10%, MEDIANTE COMPARACION DE LAS MISMAS CON CURVAS DE SEV CALIBRADAS

Valor h_2/h_1 en la curva calibrada de SEV	Límites de variación de h_2/h_1 para valores ρ_2/ρ_1					
	2/3	3/7	1/4	1/9	1/19	1/39
0,5	0,1-20	0,1-3	0,1-2	0,1-1	0,2-1	0,1-1
1	0,1-20	0,1-3,5	0,1-2	0,1-2	0,1-0,2 0,7-1,4	0,6-1,5
2	0,1-9	0,1-4	0,1-0,4 1-3	1,5-2,5	1,5-2,5	1,5-2,5
3	0,1-9	0,1-6	2,5-4,5	2,5-4	2,5-3,5	2,5-3,5
5	0,1-24	0,1-0,2 3-17	4-7,5	4-7,5	4-6	4-6
9	0,1-0,5 3-24	4-24	5-24	6-24	8-24	8-24
24	0,1-0,5 4-24	4-24	5-24	9-24	9-24	9-24

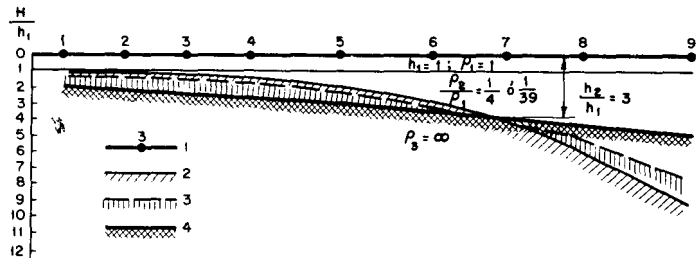
Los gráficas señalan que si h_2/h_1 en el punto de SEV que se interpreta es menor que el valor h_2/h_1 para la curva de SEV calibrada, el error de interpretación tiene signo positivo y para mayores h_2/h_1 , en el punto de SEV de la curva que se interpreta, los errores se caracterizan por el signo negativo.

El error puede alcanzar valores muy grandes que aumentan al disminuir ρ_2/ρ_1 .

Veamos dos ejemplos que ilustran el grado de desviación sobre la situación verdadera de la superficie del horizonte de apoyo al interpretar las curvas de SEV por el método de comparación. Sea un perfil con nueve SEV: $h_1 = \text{cte.}$; $\rho_2/\rho_1 = 1/4$ ó $1/39$; h_2/h_1 crece de $1/9$ a 9 ; $\rho_3 = \infty$ (fig. 146).

Fig. 146.—
 Resultado de la interpretación de curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 = \infty$) por el método de comparación con curvas calibradas de SEV, para ρ_2/ρ_1 constante (según D. P. Fedorov).

- 1.—Puntos de SEV y numeración de los mismos;
- 2.—Posición verdadera de la superficie del horizonte de apoyo;
- 3.—Posición de la superficie del horizonte de apoyo obtenida mediante la comparación con una curva calibrada para $h_2/h_1 = 3$ en el caso de $\rho_2/\rho_1 = 1/4$;
- 4.—La misma para $\rho_2/\rho_1 = 1/39$.



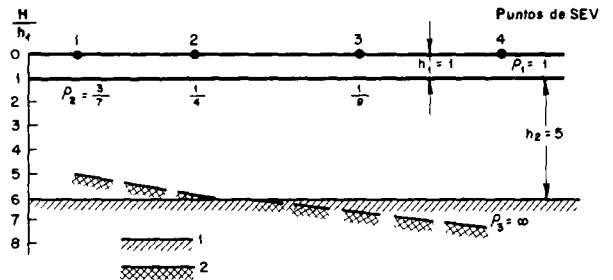
Supongamos que en el punto 7 se ha calculado la profundidad del horizonte de apoyo con suficiente exactitud, siendo para la curva de SEV correspondiente $\nu_1 = 3$. Partiendo de esta curva como calibrada y efectuando la interpretación de las restantes mediante su comparación con ella, obtenemos diferentes resultados para $\mu_1 = 1/4$ y $1/39$. Como era de esperar, para $\mu_1 = 1/4$ la interpretación está más próxima a la realidad que para $\mu_1 = 1/39$. En este último caso obtenemos una alteración grande en los datos del relieve de la superficie del horizonte investigado.

Si en la zona explorada permanece constante la profundidad del horizonte de apoyo ($h_1 = \text{cte.}; h_2 = \text{cte.}$) y sólo varía de un punto a otro el valor ρ_2/ρ_1 , entonces también se produce alteración en los resultados al interpretar las curvas de SEV mediante el método de comparación con las curvas calibradas. En la figura 147 se tiene el resultado de una tal interpretación para el perfil de SEV en que $h_1 = \text{cte.}; h_2 = 5 h_1$ y ρ_2/ρ_1 variando entre $3/7$ y $1/19$ de Oeste a Este. La interpretación se ha realizado mediante la comparación con la curva calibrada del punto 2, en la que $\rho_2/\rho_1 = 1/4$. Los resultados de la interpretación dan una posición del horizonte de apoyo que no responde en absoluto a la realidad.

Análogamente se obtienen resultados disconformes si se toma como curva calibrada cualquier otra curva de SEV en otros puntos del perfil.

Fig. 147.—
Resultado de la
interpretación
de curvas de SEV
de tipo H
($\rho_3 = \infty$) por el
método de
comparación con
curvas calibradas
de SEV para h_2/h_1
constante.

- 1.—Posición verdadera de la superficie del horizonte de apoyo;
- 2.—Posición de la superficie del horizonte de apoyo por los resultados de la interpretación mediante comparación con curvas calibradas de SEV para $\rho_2/\rho_1 = 1/4$.



En la práctica de la exploración eléctrica (por ejemplo, en el Bajo Povolzh y en otras regiones) se conocen casos en que la interpretación de las curvas de SEV por el método de comparación ha conducido a errores considerables en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo.

Es decir, el método de comparación examinado, que es uno de los métodos de interpretación de las curvas de SEV más sencillos, es de escasa utilidad.

CASO $\rho_3 \neq \infty$

Como ya se ha indicado, existen ábacos de curvas de SEV de tres capas, para el caso $\rho_3 \neq \infty$, calculadas para $\rho_3/\rho_1 = 1$ y $\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$ (tabla 7).

Por consiguiente, el número de valores de ρ_3 para los que hay ábacos calculados es muy limitado. En la práctica habitual se complementa la colección de ábacos con gran cantidad de curvas de SEV construidas gráficamente según el valor observado de la resistividad del horizonte de apoyo.

21.7. Interpretación con ayuda de los ábacos

En la interpretación cuantitativa de curvas de SEV de tres capas para el caso de $\rho_3 \neq \infty$, además de conocer ρ_2 hay que conocer también, aunque sea aproximadamente, ρ_3 . Sin embargo, si en el corte del punto de SEV estudiado no es aplicable el principio de equivalencia, entonces la interpretación puede realizarse también sin conocer el valor del parámetro ρ_2 . Veamos, no obstante, el caso general en que se supone que el valor de ρ_2 es conocido.

El proceso de interpretación con ayuda de los ábacos es muy sencillo y en la realidad no se diferencia en nada del método de interpretación de las curvas de tipo H para caso de $\rho_3 = \infty$.

Errores de interpretación en función del error en la valoración de ρ_3

Veamos los errores que dependen del error en el cálculo de parámetro ρ_3 , resistividad del horizonte de apoyo.

El examen de los ábacos de curvas teóricas de tres capas de SEV de tipo H , así como la serie de curvas de SEV del mismo tipo construidas gráficamente para diferentes ρ_3 , nos indica lo siguiente:

1) El error en la evaluación de ρ_3 , lleva consigo un error del mismo signo en la determinación de h_2 .

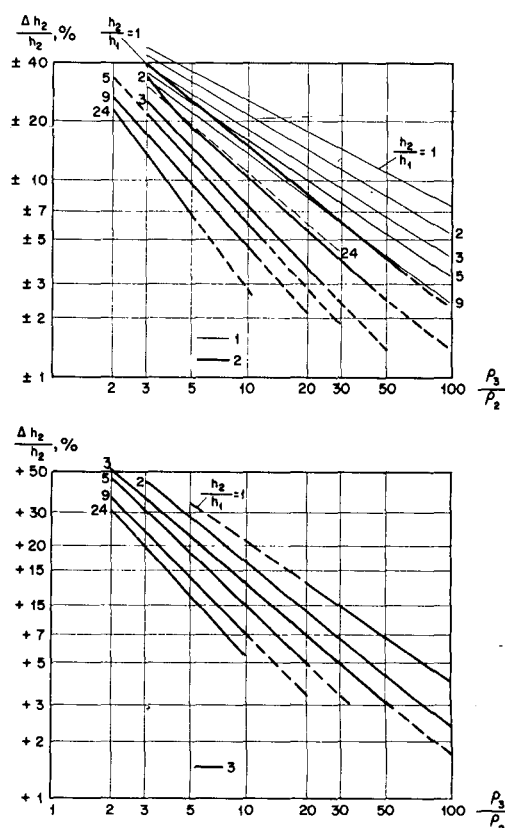
2) Los errores en sentido de aumentar ρ_3 supone para las otras condiciones iguales, un error menor en el cálculo de h_2 en valor absoluto pero con signo negativo; por tanto, en la interpretación es mejor aumentar el valor de ρ_3 que disminuirlo.

3) Los errores en el cálculo de h_2 , disminuyen, como era de esperar, al aumentar los valores dados h_2/h_1 y ρ_3/ρ_2 .

En la figura 148 se muestran los gráficos de variación del error de $\Delta h_2/h_2$ en función de la relación de ρ_3/ρ_2 para diferentes h_2/h_1 y un error en la valoración de ρ_3 igual a +100%, +50% y -50%. Como se ven en los gráficos, ya para $\rho_3/\rho_2 = 15$, el error en el cálculo de h_2 , para $h_2/h_1 = 1$ es en total de +10%, para un error en la valoración de ρ_3 de +50%. Para este mismo error en la valoración de ρ_3 , pero de signo negativo, la relación ρ_3/ρ_2 necesita ser no menor de 55 para que el error en el cálculo de h_2 para $h_2/h_1 = 1$, no exceda de -10%.

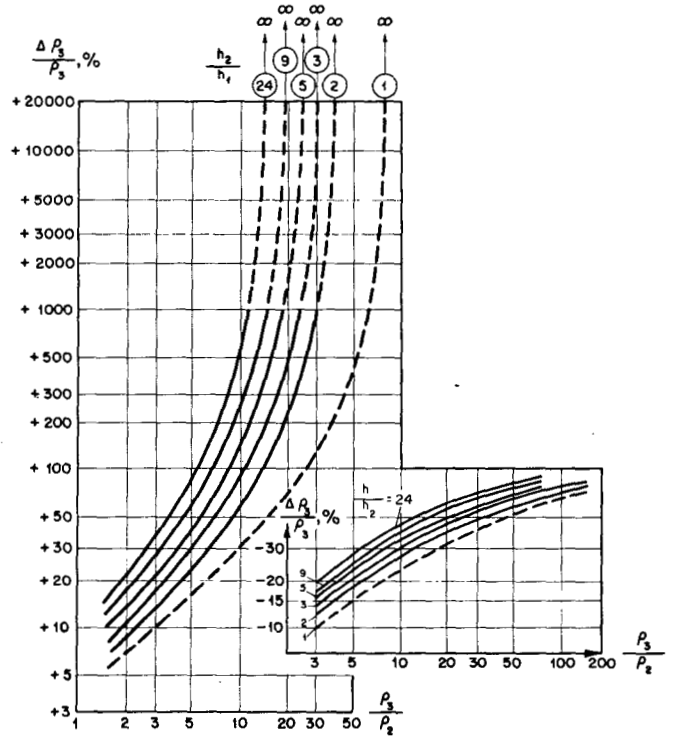
Fig. 148.—Error en la interpretación de curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 \neq \infty$) en función del error de la evaluación de ρ_3 .

- 1.—Error $\Delta \rho_3/\rho_3 = -50\%$;
- 2.—Error $\Delta \rho_3/\rho_3 = +50\%$;
- 3.—Error $\Delta \rho_3/\rho_3 = +100\%$.



En la figura 149 se presentan las curvas que permiten calcular fácilmente los límites de errores admisibles en la evaluación de ρ_3 , para los que el error de interpretación no excede de $\pm 10\%$. Si por ejemplo, en el corte examinado $h_2/h_1 = 3$ y $\rho_3/\rho_2 = 10$, entonces es suficiente calcular ρ_3 con una exactitud que oscilaría entre $+30$ y -30% de su verdadero valor para que el error relativo en la evaluación de h_2 no exceda de $+10\%$. Evidentemente, el error en la evaluación de la profundidad del horizonte de apoyo será aún menor.

Fig. 149.—Límites de error admisibles en la valoración de ρ_3 , para el caso de interpretación de las curvas de SEV de tipo H con error $\Delta h_2/h_2$ del orden de $\pm 10\%$.



En la interpretación de curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 \neq \infty$) a menudo y para simplificar se supone la resistividad del horizonte de apoyo infinitamente grande construyendo en la rama derecha ascendente de la curva una falsa asíntota con

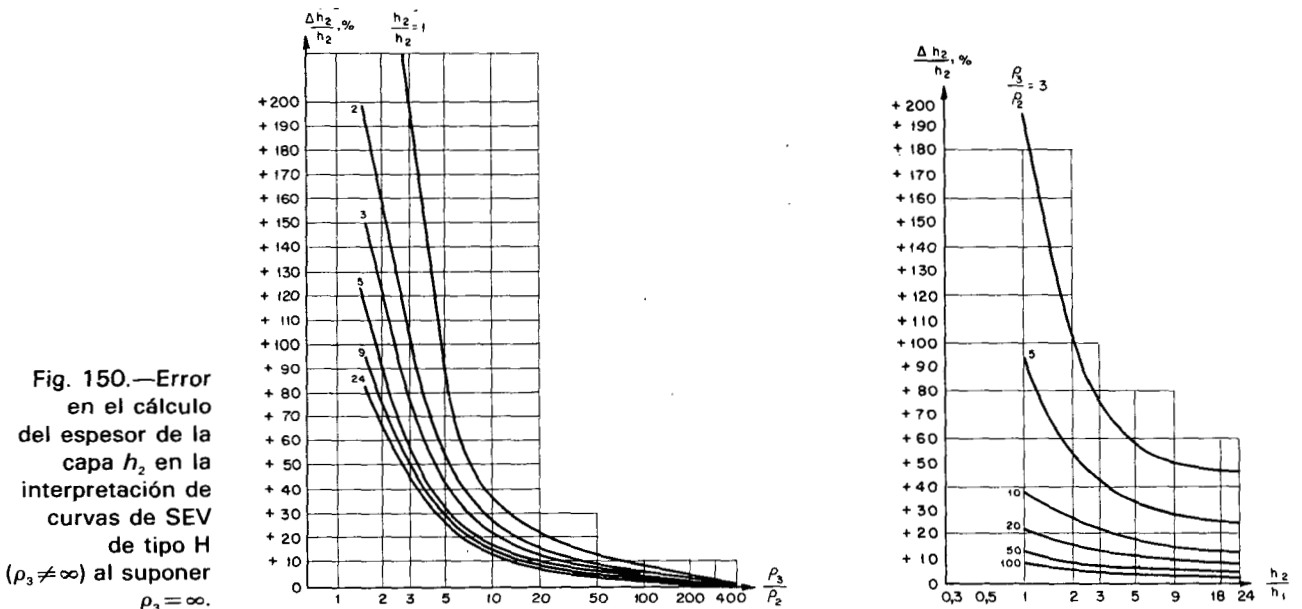


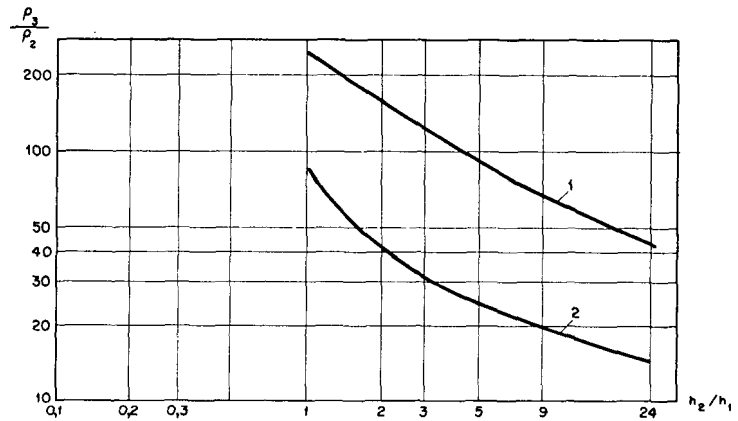
Fig. 150.—Error en el cálculo del espesor de la capa h_2 en la interpretación de curvas de SEV de tipo H ($\rho_3 \neq \infty$) al suponer $\rho_3 = \infty$.

ángulo de 45° con el eje de abscisas. Con ello se cometen errores de signo positivo en el cálculo de h_2 , tanto mayores cuanto menor sea h_2/h_1 y ρ_3/ρ_2 (fig. 150), errores que, como vemos, crecen con la disminución de h_2/h_1 y ρ_3/ρ_2 , de modo especialmente rápido para el caso de $\rho_3/\rho_2 \leq 10$. Por ejemplo, para la interpretación de la curva de SEV en la que $h_2/h_1 = 2$ y $\rho_3/\rho_2 = 20$, el error en el cálculo de h_2 , al suponer $\rho_3/\rho_2 = \infty$, llega a +15%. Al disminuir ρ_3/ρ_2 a 5 el error, permaneciendo constantes las restantes condiciones, sube a +55%.

En la figura 151 se dan los valores mínimos de ρ_3/ρ_2 para los que dentro de los límites admisibles de exactitud de interpretación (+10%) se puede suponer $\rho_3 = \infty$, en lugar de su valor finito. Estos límites, como era de esperar, disminuyen al crecer h_2/h_1 . Si para $h_2/h_1 = 2$ el valor mínimo de ρ_3/ρ_2 hay que llevarlo a casi 40, entonces para $h_2/h_1 = 24$ el mismo desciende hasta 15.

Fig. 151.—Valores mínimos de ρ_3/ρ_2 para los que en la interpretación de las curvas de SEV de tipo H con $\rho_3 \neq \infty$, es admisible suponer $\rho_3 = \infty$ con errores $\Delta h_2/h_2$ del orden de +5 y +10%.

$$\text{Error } \frac{\Delta h_2}{h_2};$$
 1. — +5%;
 2. — +10%.



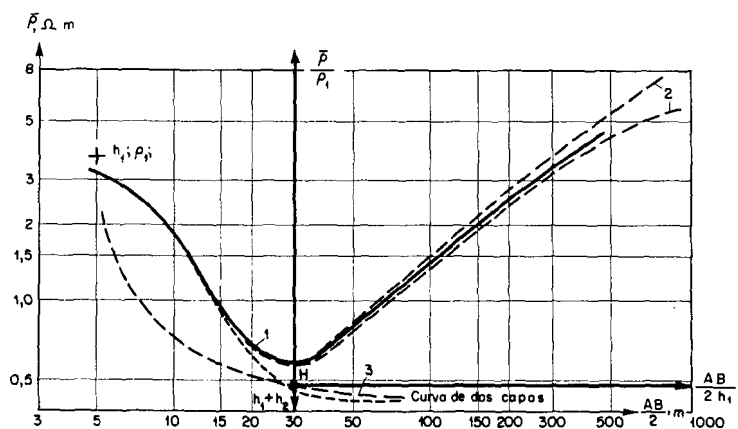
21.8. Interpretación con ayuda del ábaco H y del ábaco de dos capas

Las curvas de SEV que reflejan un corte de tres capas de tipo H en el que $\rho_3 \neq \infty$, se interpretan a menudo sin utilizar los ábacos de tres capas, usando sólo el ábaco de SEV de dos capas y el ábaco auxiliar H.

Se calculan, con ayuda del ábaco de dos capas, los valores de h_1 y ρ_1 para la curva dada de SEV (fig. 152). Conociendo ρ_2 se calculó $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. La curva de SEV se superpone al ábaco auxiliar H haciendo coincidir el origen de coordenadas del mismo con el punto h_1, ρ_1 del impreso de SEV. Se lleva al impreso la curva del ábaco H correspondiente a μ_1 . Se supone que en alguna parte de esta última curva debe estar el punto H de coordenadas $x_H = h_1 + h_2, y_H = \rho_1$. Este supuesto será tanto más exacto cuanto menos se diferencie ρ_3/ρ_2 de ∞ , de que ρ_3/ρ_2

Una vez calculada en el impreso de la gráfica de SEV que se interpreta la curva μ_1 del ábaco H, se calcula con ayuda del ábaco de dos capas la posición del punto H en esta curva. Ella queda fijada por el origen de coordenadas del ábaco de dos capas una de cuyas curvas (trazada o interpolada) se hace coincidir, mediante el traslado de la gráfica de SEV sobre el ábaco, de modo óptimo con la rama ascendente de la gráfica de SEV. Para ésta es $x_H = h_1 + h_2$.

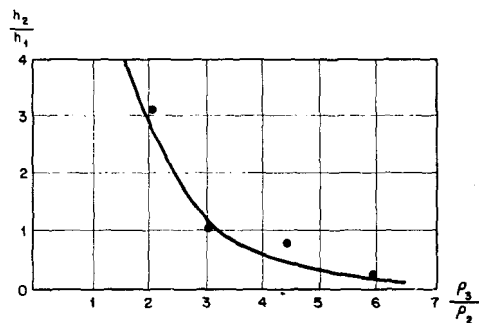
Fig. 152.—
Interpretación
de curvas de SEV
de tipo H
($\rho_3 \neq \infty$)
mediante el ábaco
auxiliar H y el
ábaco de dos
capas.
1.—Curva que
se interpreta;
2.—Curvas del
ábaco de dos
capas;
3.—Curva
del ábaco H.



El examen de las curvas de SEV de los ábacos demuestra que si el valor de $\bar{\rho}$ está medido con suficiente exactitud, entonces el error $\Delta H/H$ de interpretación no excede de $\pm 10\%$ (con predominio del signo positivo), con la condición de que ρ_3/ρ_2 no sea menor de 2. Para este mínimo es necesario hacer h_2/h_1 próximo a 3.

En la figura 153 se muestra una gráfica que da el valor menor de h_2/h_1 , para diferentes ρ_3/ρ_2 , que permite la interpretación de las curvas de SEV con suficiente exactitud, mediante la aplicación del método indicado. Como se ve, si $\rho_3/\rho_2 \geq 5$, entonces para una interpretación segura de las curvas de SEV basta que h_2/h_1 sea no menor de 0,5.

Fig. 153.—Valores
mínimos de h_2/h_1
y ρ_3/ρ_2 para
los que es
admisibile la
interpretación de
las curvas de SEV
de tipo H con
ayuda del ábaco H
y el de dos capas,
si $\rho_3/\rho_1 < 1$.



21.9. Interpretación con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov

La interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tres capas de tipo H, para $\rho_3 \neq \infty$, con auxilio de los nomogramas de A. I. Bogdanov, se efectúa por el método indicado ya anteriormente. Estos nomogramas, en el caso de que en el corte estudiado no sea aplicable el principio de equivalencia, posibilitan el cálculo no sólo de h_2 , sino también de ρ_2 .

Para elegir el nomograma conveniente es preciso conocer ρ_3/ρ_1 en el punto de SEV dado. Se pueden introducir errores, que se salen de los límites admitidos, debido a que las curvas del nomograma, para el caso de un valor de ρ_3/ρ_1 erróneo, no se cortan en un punto. Mediante aproximaciones sucesivas (empleo de nomogramas correspondientes a valores sucesivos de $\log(\rho_3/\rho_1)$) se encuentra el nomograma con curvas que prácticamente se cortan en un punto. Se calculan las

coordenadas del mismo y con ello se soluciona el problema de la interpretación.

La exactitud de la interpretación por el método indicado depende de la exactitud obtenida en la curva de SEV. Un error de +5% en la medición de ρ supone un error en el cálculo de h_2 y ρ_2 de ± 15 a 20%.

21.10. Interpretación con ayuda del ábaco de dos capas

La interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H para $\rho_3 \neq \infty$ con ayuda del ábaco de dos capas, lo mismo que en el caso de $\rho_3 = \infty$, lleva consigo errores en el sentido de aumentar la profundidad del horizonte de apoyo. La investigación de estos errores para el caso $\rho_3/\rho_1 = 1$, señala que los mismos pueden ser muy grandes para h_2/h_1 pequeño, incluso en el caso de que ρ_2 se diferencie muy poco de ρ_1 .

Para $h_2/h_1 \geq 5$, los errores de interpretación con ayuda del ábaco de dos capas no exceden de +10%, para valores de ρ_3/ρ_1 por lo menos desde 1/39 a 2/3; en el caso de $h_2/h_1 \geq 10$ este error es próximo a cero.

21.11. Interpretación por el ángulo α de inclinación de la rama final de la curva

Este método de interpretación de las curvas de SEV, para el caso en que el horizonte de apoyo no tiene resistividad infinitamente grande, fue propuesto hace relativamente poco tiempo por K. A. Shajnes (en el año 1950) y tiene por ahora escasa aplicación. La base del método consiste en el estudio de la dependencia entre el ángulo α y la resistividad media de todas las capas del corte que descansan sobre el horizonte de apoyo.

En las curvas calculadas de SEV de tres capas de tipo H, para el caso $\rho_3 \neq \infty$, existe, como se ha demostrado anteriormente, tal dependencia —siendo ρ_3/ρ_1 constante y h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 variables— que puede ser expresada de modo aproximado por una curva que indica la disminución de la resistividad media ρ_r del corte al aumentar α .

Las curvas de SEV de tipo H correspondientes a un corte de tres capas en el que $\rho_3 \approx \rho_1$, ρ_2/ρ_1 varía entre 1/39 y 2/3 y h_2/h_1 entre 1/9 y 24, se pueden interpretar aproximadamente con ayuda de la gráfica a de la figura 118. También se pueden interpretar las curvas de SEV del mismo tipo y para los mismos límites de variación de los parámetros h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 del corte, pero para $\rho_3 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$, con ayuda de la gráfica b de la figura 118.

El proceso de interpretación es muy sencillo. No exige conocimiento previo de los parámetros del corte. Se traza la tangente a la rama ascendente de la curva de SEV que se interpreta (figura 108) y con ayuda de un transportador de precisión se calcula el ángulo α de esta tangente con el eje de abscisas. Por el valor de α se obtiene, en las gráficas a ó b de la figura 118 que expresa la relación entre ρ_r y α para los valores de ρ_3/ρ_1 (fig. 108) el correspondiente valor de ρ_r .

En el impreso de la curva de SEV que se interpreta se traza la recta $\bar{\rho} = \rho_r$. La abscisa del punto de intersección de esta recta con la tangente a la rama ascendente de la curva (fig. 108) nos da la profundidad H del horizonte de apoyo.

El estudio del tema señala que los errores en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo por este método de interpretación llegan a +25 a 35%. Sin embargo, a pesar de tal error, sobre todo con signo negativo, los resultados de la interpretación como se aprecia al compararla con la verdadera, dan una idea bastante aproximada de la marcha del horizonte de apoyo.

Para la utilización del método examinado, se confeccionan en la práctica gráficos que relacionan ρ_r con α , para cada terreno examinado, en función de los resultados de la interpretación de las curvas de SEV en una serie de puntos del mismo en que se conoce la profundidad del horizonte de apoyo mediante perforaciones mecánicas o sondeos sísmicos.

CURVAS DE SEV DE TIPO A

Las curvas de SEV de este tipo reflejan el corte eléctrico de tres capas en el que la resistividad de las mismas crece de la superior a la inferior (fig. 12). En la colección de ábacos con gráficas de SEV de tipo A, como ya hemos indicado anteriormente, se tienen curvas calculadas para los seis parámetros, ρ_2/ρ_1 (3/2, 7/3, 4, 9, 19, 39) y tres parámetros ρ_3/ρ_1 (∞ ; $[\rho_2/\rho_1]^2$; $[\rho_2/\rho_1]^{3/2}$). Para todas las curvas teóricas de SEV el parámetro h_2/h_1 varía de 1/9 a 24.

La nota característica de las curvas de SEV de tipo A es el crecimiento gradual de $\bar{\rho}$ al aumentar la separación de electrodos. Las curvas no tienen ni máximos ni mínimos. En cuanto a la capa intermedia, no se refleja en la curva de SEV para espesores de la misma relativamente pequeños o cuando su resistividad se diferencia poco de ρ_3 . En este caso se puede confundir con una curva de dos capas (fig. 154 a) y por ello se cometen con frecuencia errores en la interpretación de estas curvas de tipo A.

Cuando la segunda capa tiene suficiente espesor y su resistividad es relativamente baja respecto a la del horizonte de apoyo, la misma se refleja con suficiente claridad en la curva de SEV (fig. 154 b). Se deduce por consiguiente que cuanto mayor sea la resistividad de la segunda capa en el corte de tipo A, tanto mayor, en comparación con el de la primera capa, debe ser su espesor para que la misma se refleje en la curva de SEV. En la figura 155 se muestra un gráfico que da, de modo aproximado, para diferentes valores de ρ_2/ρ_1 y $\rho_3 = \infty$, estos valores máximos de h_2/h_1 para los que aún no se refleja la segunda capa en la curva de SEV. Como se ve, por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 4$, este valor máximo es de $h_{202}/h_1 = 1$. Al aumentar ρ_2/ρ_1 hasta 39 crece ya hasta $h_2/h_1 \approx 5$.

Fig. 154.—
Aspecto de curvas
de SEV
de tipo A.
a.— $h_2 = 100$ m,
 $h_2/h_1 = 1$;
b.— $h_2 = 900$ m,
 $h_2/h_1 = 9$.

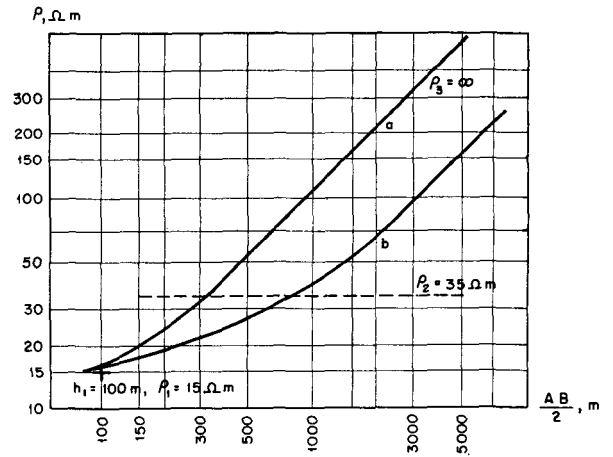
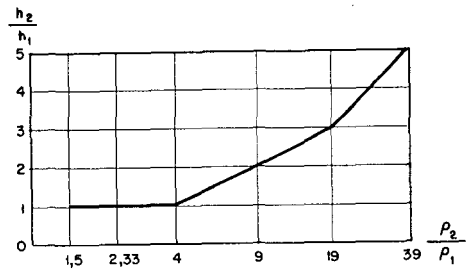


Fig. 155.—Curvas
de SEV de tipo A,
 $\rho_3 = \infty$. Regla
del valor máximo
de h_2/h_1 para el
que aún no se
refleja la segunda
capa en la curva
de SEV.



22. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo A. Cálculo de los parámetros ρ_2 y ρ_1 . Dependencia de la variación de ρ_1 de los parámetros de las capas de corte

Para la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo A se confeccionan planos de tipo de curvas; de valores h_1 y ρ_1 ; de igual resistividad aparente para una o dos separaciones de AB; de igual conductancia longitudinal total S (para el caso de $\rho_3 = \infty$); de ángulo de inclinación α ; de valor L (para $\rho_3 \neq \infty$) y de resistividad aparente del corte. Todo lo expuesto sobre estos documentos para las curvas de SEV de tipo H es también aplicable a las del tipo considerado.

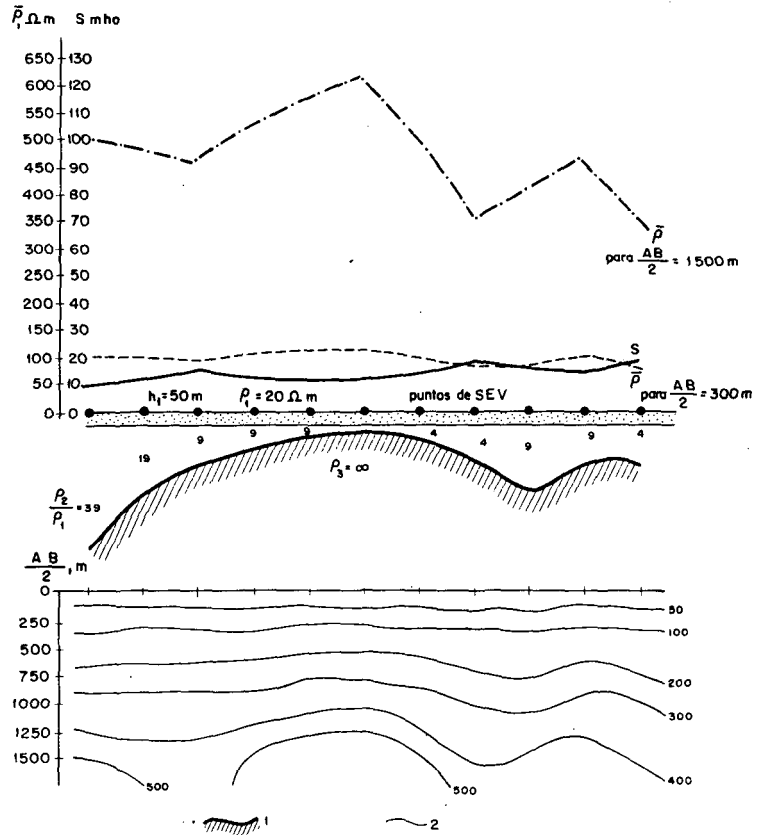
El plano de tipos de curvas de SEV puede señalar la variación de la resistividad del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$; $\rho_3 \neq \infty$) claridad con que se refleja en las curvas de SEV el nivel intermedio, alteraciones en las gráficas de SEV y otros signos externos característicos de las curvas que de un modo u otro van ligados con las particularidades de la estructura geológica de la región explorada.

El corte de resistividades aparentes (fig. 156), a diferencia de lo que ocurre en el caso de SEV de tipo H, se caracteriza por una marcha bastante suave de las isolíneas y sólo para grandes separaciones de electrodos se puede apreciar la subida del horizonte de apoyo.

Las curvas de SEV de tipo A son en general, a causa de su monotonía, poco favorables para la interpretación cualitativa y cuantitativa. En particular es difícil juzgar por el aspecto de las curvas sobre las variaciones de ρ_2 y h_2 .

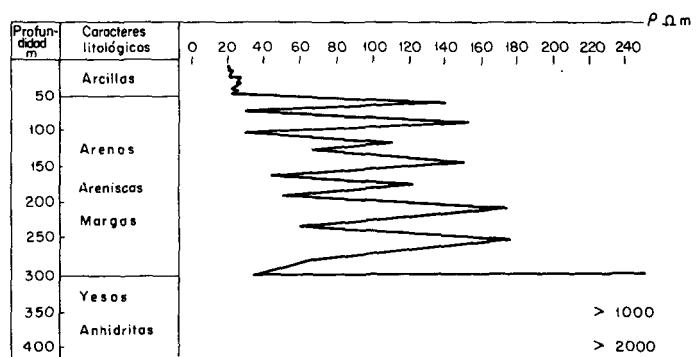
Los parámetros ρ_2 y h_2 para la interpretación cuantitativa se calculan normalmente por las curvas de SEV próximos a

Fig. 156.—Perfiles eléctricos y corte de resistividad aparente para curvas de SEV de tipo A.
 $\rho_3 = \infty$.
 1.—Situación verdadera de la superficie de apoyo;
 2.—Isolíneas de resistividad aparente.



pozos. Sea, por ejemplo, el corte geoelectrico de la figura 157, cuya curva de SEV realizada en las proximidades de un sondeo mecánico, se muestra en la figura 158. El horizonte de apoyo, según la gráfica de SEV tiene resistividad infinita, aunque según la testificación del sondeo tiene valores entre 1.000 y 2.000 ohm.m.

Fig. 157.—Corte geoelectrico de tipo A.



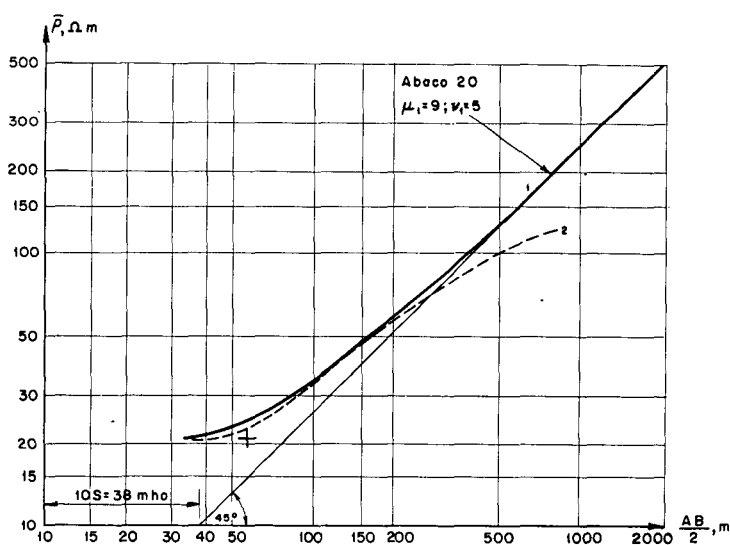
Con ayuda del ábaco de dos capas se calcula para la curva de SEV, $h_1 = 55 \text{ m}$, $\rho_1 = 21 \text{ ohm.m}$ y $S = 3,8 \text{ mho}$, $S_1 = h_1/\rho_1 = 2,62 \text{ mho}$; de aquí $S_2 = h_2/\rho_2 = 1,18 \text{ mho}$. Los resultados de la testificación y de los datos del sondeo mecánico dan una profundidad del horizonte de apoyo $H = 300 \text{ m}$. Por tanto, el espesor h_2 del segundo nivel eléctrico puede estimarse en 245 m. Ello da la posibilidad de calcular $\rho_2 = H_2/S_2 \approx 200 \text{ ohm.m}$.

También podía haberse efectuado el cálculo con ayuda de los ábacos de tres capas. La diagrafía del sondeo mecánico permite saber que $\nu_1 = 250/50 = 5$. En la colección de curvas de SEV de tres capas buscamos el ábaco correspondiente a $\nu_1 = 5$, $\rho_3 = \infty$. Este es el ábaco 20. Superponiendo al mismo nuestra curva, tenemos que la coincidencia óptima se consigue con la curva del ábaco de módulo $\mu_1 = 9$. Para ésta, $h_1 = 53$ m, $\rho_1 = 21$ ohm.m. De aquí, $\rho_2 = 9,21 \approx 190$ ohm.m. La resistividad media longitudinal es $\rho_l = 300/3,8 = 79$ ohm.m.

Como se ve, para el cálculo de ρ_2 y ρ_l sólo es necesario tomar de las diagrafías la posición de los límites de las capas eléctricas. Sin embargo, también es recomendable su uso para tener una idea de las resistividades medias longitudinal y transversal de las capas del corte y de su anisotropía.

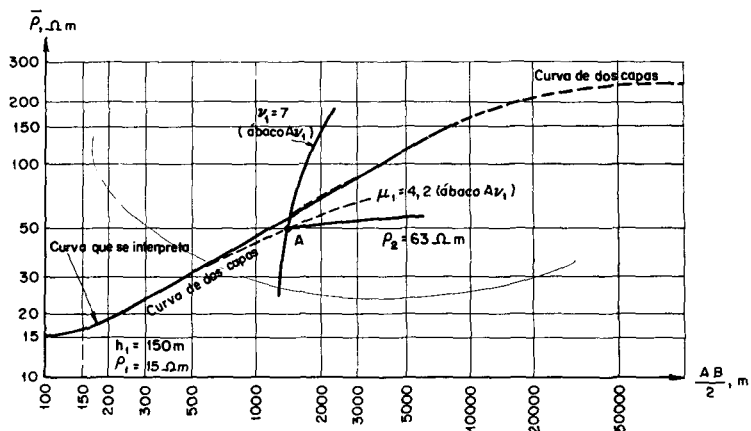
Si en la colección no se encuentra el valor ν_1 observado, se podría utilizar un ábaco con valor ν'_1 próximo, tanteando previamente con ayuda del diagrama de equivalencia (fig. 72), la posibilidad de tal sustitución. Obtenido entonces el módulo μ'_1 , se deduce inmediatamente el valor μ_1 . Si no es posible la sustitución de ν_1 por ν'_1 , hay que obtener el ábaco en cuestión gráficamente. En cuanto al cálculo de ρ_2 se pueden utilizar para ello también otros medios.

Fig. 158.—
Cálculo de ρ_2
mediante curvas
paramétricas de
SEV de tipo A
($\rho_3 = \infty$).
1.—Curva
paramétrica;
2.—Curva $\mu_1 = 7$
de dos capas.



Supongamos, por ejemplo, que por un pozo, próximo al cual se ha situado la curva de SEV de tipo A (fig. 159), se sabe que $h_2/h_1 = 7$. De la curva de SEV y con ayuda del ábaco de dos capas obtenemos $h_1 = 150$ m, $\rho_1 = 15$ ohm.m. Para valorar ρ_2 superponemos la curva de SEV sobre el ábaco A ν_1 , haciendo coincidir el origen de coordenadas del mismo con el punto h_1, ρ_1 y calcando en el impreso de SEV la curva de módulo $\nu_1 = 7$. El punto A de anisotropía se encuentra en alguna posición en esta curva. Para fijarla superponemos el impreso de SEV sobre el ábaco de dos capas de modo que el origen de coordenadas de éste último caiga sobre la curva

Fig. 159.—Cálculo de ρ_2 en curvas de SEV de tipo A con ayuda de los ábacos $A\nu_1$ y de dos capas.



$\nu_1 = 7$ del impreso y a continuación desplazamos el impreso conservando el paralelismo de sus ejes con los del ábaco hasta que coincida exactamente la rama ascendente final de la curva con una del ábaco.

Lo más frecuente, para $\rho_3 \neq \infty$, es que la rama final de la curva de SEV no alcance su posición asintótica (en el ejemplo dado, prolongada la curva de SEV hasta $AB = 16$ km, quedaba la rama final de la misma aún muy lejos de alcanzar su asíntota).

En estos casos es deseable conocer por los datos de la testificación, aunque sea el orden de magnitud de la resistividad ρ_3 . Si no se ha alcanzado el horizonte de apoyo en la perforación entonces se valora ρ_3 de un modo hipotético. Sea en nuestro caso $\rho_3 \approx 250$ ohm.m. Entonces se puede con suficiente seguridad hallar una curva del ábaco de dos capas que coincida con la rama final supuesta de la gráfica de SEV que se interpreta. El origen de coordenadas del ábaco nos da la posición del punto A. Llevamos el mismo al impreso de SEV. Ahora queda tan sólo calcular el módulo μ_1 de la curva del ábaco $A\nu_1$ que pasa por el punto A. Para ello trasladamos el origen de coordenadas del ábaco $A\nu_1$ de nuevo al punto h_1 , ρ_1 (conservando un riguroso paralelismo entre los ejes del impreso y del ábaco) y tomamos del mismo, directamente o por interpolación, la curva incógnita de módulo μ_1 . En nuestro caso es $\mu_1 = 4,2$. De aquí, $\rho_2 = 63$ ohm.m.

El parámetro ρ_2 se puede obtener también con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov, si es que en el corte eléctrico correspondiente a los puntos de SEV dados no es aplicable el principio de equivalencia. Sin embargo, para este caso los parámetros calculados no están libres de la influencia de la posible anisotropía del corte. El mismo cálculo de ρ_2 conociendo la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo conduce a un valor de este parámetro, ya libre de la acción de la influencia de la anisotropía.

Para la interpretación de las curvas de SEV de tipo A, caracterizadas por una variación monótona de $\bar{\rho}$, se hace uso con mucha frecuencia, en el caso de $\rho_3 = \infty$, del parámetro resistividad longitudinal de las capas que descansan sobre el horizonte de apoyo.

Veamos cómo varía esta resistividad en función de la variación de los parámetros de las capas del corte de tipo A. El análisis —ver fórmula (26)— señala lo siguiente.

Influencia de h_1 y h_2 . Al crecer h_1 o decrecer h_2 , ρ_i decrece; el grado de este decrecimiento aumenta con el crecimiento del valor inicial de h_2 y ρ_2/ρ_1 . Sin embargo, para valores iniciales grandes de h_2 ($h_2/h_1 \geq 3$) la intensidad de este decrecimiento de ρ_i permanece constante o incluso baja algo al crecer h_2 .

En la tabla 30 se da la variación admisible de los espesores h_1 o h_2 para la que ρ_i no varía más de $\pm 10\%$ de su valor para los parámetros iniciales del corte.

TABLA 30

VARIACIONES ADMISIBLES DE LOS PARAMETROS h_1 O h_2 EN EL CORTE DE TIPO A ($\rho_3 = \infty$) DE MODO QUE ρ_i NO VARIE MAS DE $\pm 10\%$ DE SU VALOR INICIAL

Parámetros iniciales del corte		Variación admisible de h_1 (o h_2)	
$\nu_1 = h_2/h_1$	$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Disminución de h_1 (o aumento de h_2) número de veces	Aumento de h_1 (o disminución de h_2) número de veces
24	39	1,1	1,1
	9	1,5	1,5
	3/2	ilimitado	5,0
9	39	1,1	1,2
	9	1,3	1,3
	3/2	ilimitado	4,6
5	39	1,1	1,2
	9	1,2	1,3
	3/2	≈ 100	3,8
3	39	1,1	1,2
	9	1,2	1,3
	3/2	≈ 6	3,6
1	39	1,2	1,25
	9	1,3	1,3
	3/2	2,8	4,0
1/2	39	1,3	1,5
	9	1,4	1,7
	3/2	2,6	10,0

Influencia de ρ_1 . Al crecer ρ_1 crece ρ_i . El grado de este crecimiento aumenta con el decrecimiento de los valores iniciales de h_2/h_1 y con el crecimiento de ρ_2 .

La variación admisible de ρ_1 con la condición de que la variación de ρ_i no sea mayor de $\pm 10\%$ de su valor para los parámetros iniciales del corte se ha indicado en la tabla 31.

TABLA 31

VARIACIONES ADMISIBLES DEL PARAMETRO ρ_1 EN EL CORTE DE TIPO A ($\rho_3 = \infty$) DE MODO QUE ρ_1 NO VARIE MAS DE $\pm 10\%$ DE SU VALOR INICIAL

Parámetros iniciales del corte		Variación admisible de ρ_1 , número de veces	
$\nu_1 = h_2/h_1$	$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Disminución	Aumento
24	39	1,25	1,25
	9	1,4	1,55
	3/2	2,9	ilimitado
9	39	1,10	1,10
	9	1,20	1,25
	3/2	1,8	2,5
5	39	1,10	1,10
	9	1,2	1,15
	3/2	1,4	1,7
3	39	1,15	1,10
	9	1,15	1,15
	3/2	1,25	1,30
1	39	1,1	1,10
	9	1,1	1,15
	3/2	1,1	1,20
1/2	39	1,1	1,10
	9	1,1	1,15
	3/2	1,1	1,20

Como se ve, los límites de las variaciones admisibles del parámetro ρ_1 son pequeños incluso para los valores de ρ_2/ρ_1 relativamente pequeños y grandes de h_2/h_1 .

Influencia de ρ_2 . En la figura 160 se tiene un gráfico que expresa la variación de ρ_1 en función de ρ_2 al permanecer constantes los restantes parámetros en el corte de tipo A ($\rho_3 = \infty$). En el mismo se aprecia que ρ_1 crece al crecer ρ_2 . La intensidad de este crecimiento disminuye para h_2/h_1 relativamente pequeño y ρ_2/ρ_1 grande.

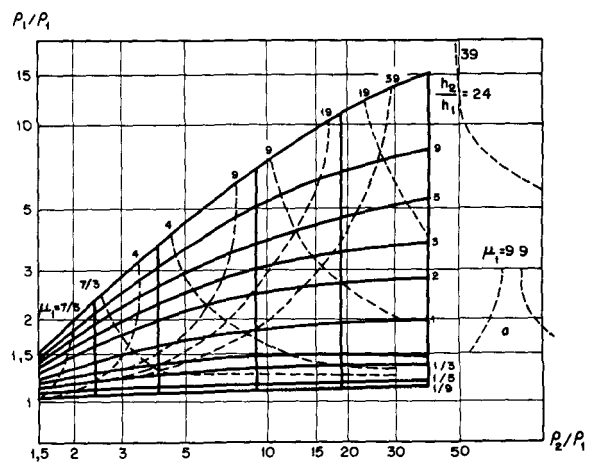
Las líneas de trazos interrumpidos señalan los límites de las zonas de variación admisible de ρ_2 para que se cumpla la condición de que ρ_1 no varíe más de $\pm 10\%$. En la tabla 32 se dan los valores numéricos de estos límites. Se tiene que para valores iniciales de h_2/h_1 relativamente pequeños (< 3) y grandes de ρ_2/ρ_1 (≥ 9), el parámetro ρ_2 puede aumentarse entre límites amplios sin provocar aumentos grandes en ρ_1 .

TABLA 32

VARIACIONES ADMISIBLES DEL PARAMETRO ρ_2 EN EL CORTE DE TIPO A ($\rho_3 = \infty$) QUE REDUCEN LA VARIACION DE ρ_1 ENTRE LIMITES QUE NO EXCEDEN DE $\pm 10\%$ DE SU VALOR INICIAL

Parámetros iniciales del corte		Variación admisible de ρ_2 , número de veces	
$\nu_1 = h_2/h_1$	$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Disminución	Aumento
24	39	1,30	1,23
	9	1,12	1,11
	3/2	1,15	1,10
9	39	1,50	1,90
	9	1,20	1,17
	3/2	1,16	1,10
55	39	1,90	5
	9	1,30	1,40
	3/2	1,16	1,13
33	39	2,50	ilimitado
	9	1,38	1,60
	3/2	1,16	1,17
1	39	4,90	ilimitado
	9	2,14	10
	3/2	1,16	1,17
1/2	39	10	ilimitado
	9	3,30	ilimitado
	3/2	1,25	1,47

Fig. 160.—Curvas de SEV de tipo A. $\rho_3 = \infty$. Variación de ρ_1/ρ_0 en función de ρ_2/ρ_1 . a.—Zona de variación admisible de ρ_2 , para la que ρ_1 no varía más de $\pm 10\%$ de su valor inicial.



23. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo A

23.1. Interpretación con ayuda de los ábacos

Como de costumbre es conveniente conocer en líneas generales al comienzo de la interpretación el valor del parámetro ρ_2 en toda la zona de exploración. También conviene estimar previamente el parámetro ρ_3 si es que el horizonte de apoyo no tiene una resistividad infinitamente grande.

Con ayuda del ábaco de dos capas se calcula h_1 y ρ_1 en las curvas de SEV. Calculamos $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ que nos indican el ábaco que debemos tomar para la interpretación. La curva objeto de interpretación se superpone al ábaco escogido y mediante la coincidencia con una de sus curvas o interpolando entre dos de ellas se halla el valor $\nu_1 = h_2/h_1$. El origen de coordenadas del ábaco nos da los valores de h_1 y ρ_1 y la rama asintótica de la curva del ábaco el valor ρ_3 . Calculado $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$ y $H = h_1 + h_2$ el problema queda resuelto. Vemos, por tanto, que el proceso de interpretación no se diferencia del seguido para las curvas de SEV de tipo H. Por tanto, todas las observaciones efectuadas sobre la interpretación de estas últimas con ayuda de los ábacos son aplicables también a las curvas de tipo A. Veamos un ejemplo.

Sea en un punto de SEV, cuya curva se representa en la figura 161, $\rho_2 = 100 \text{ ohm.m}$ y $\rho_3 \approx 300 \text{ ohm.m}$. Con ayuda del ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 50 \text{ m}$, $\rho_1 = 20 \text{ ohm.m}$. De aquí, $\mu_1 = 5$, $\mu_2 = 15$. El ábaco más próximo a estos valores es el 71 ($\mu_1 = 4$, $\mu_2 = 16$).

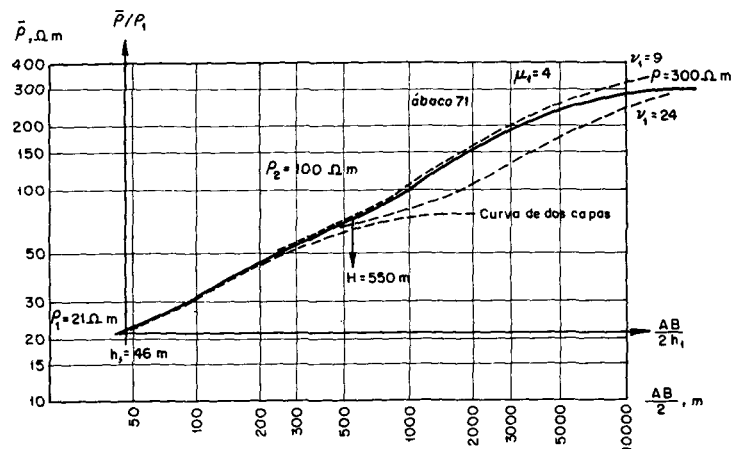


Fig. 161.— Interpretación de curva de SEV de tipo A con ayuda de ábacos.

Examinando el nomograma de equivalencia para el corte de tipo A, $\rho_3 = \infty$ (fig. 72), hallamos que, aún para grandes valores de h_2/h_1 , con $\mu_1 = 5$, se puede disminuir este módulo en el corte hasta $\mu_1 = 4$; por tanto, la curva de SEV correspondiente al corte así variado permanece prácticamente la misma. Por consiguiente, para la interpretación de la curva de SEV dada se puede utilizar el ábaco 71. La mejor coincidencia de la rama ascendente de la curva de SEV se

consigue entre las curvas del ábaco con módulos $\nu_1 = 9$ y $\nu'_1 = 24$; calculamos mediante interpolación

$$\nu'_1 = 9,5 \quad h_1 = 46 \text{ m} \quad \rho_1 = 21 \text{ ohm.m}$$

de donde $h'_2 = \nu'_1 \cdot h_1 \approx 430 \text{ m}$; $\rho'_2 = \mu'_1 \cdot \rho_1 \approx 85 \text{ ohm.m}$.
Tenemos, por tanto, según el principio de equivalencia:

$$h_2 = h'_2 \cdot \rho_2 / \rho'_2 \approx 500 \text{ m.}$$

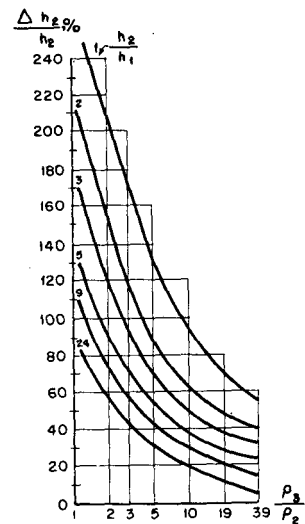
y, por consiguiente, $H = h_1 + h_2 \approx 550 \text{ m}$.

Como se aprecia en la curva de SEV, para esta profundidad, relativamente pequeña, en el corte de tipo A para $\rho_3 \neq \infty$ se necesitan separaciones AB de cerca de 30 km para que la rama asintótica final de la curva defina bien la resistividad del horizonte de apoyo. Si para las mismas restantes condiciones la resistividad del horizonte de apoyo fuera infinitamente grande, entonces serían suficientes separaciones AB-4-6 km.

Errores de interpretación motivados por inexactitud en la determinación de ρ_3

En la interpretación de las curvas de SEV de tipo A que no han sido prolongadas suficientemente, para definir el valor de la resistividad del horizonte de apoyo se toma con frecuencia $\rho_3 = \infty$. Ello lleva consigo la introducción de errores en el cálculo de h_2 . Ellos tienen signo positivo y tanto mayor valor absoluto cuanto menor sea h_2/h_1 y ρ_3/ρ_2 . En la figura 162 se muestra un gráfico de tales errores obtenido mediante el análisis de las curvas teóricas de SEV. El mismo pone de manifiesto que sólo en caso de ρ_3/ρ_2 bastante grande se puede tomar en la interpretación de las curvas de SEV de tipo A $\rho_3/\rho_2 = \infty$ sin cometer grandes errores (hasta +10%). Incluso para $h_2/h_1 = 24$ se necesita que la relación ρ_3/ρ_2 sea al menos igual a 20.

Fig. 162.—Errores en el cálculo del espesor de la capa h_2 en la interpretación de las curvas de tipo A ($\rho_3 \neq \infty$), al suponer que $\rho_3 = \infty$.



Por consiguiente, hay que utilizar con gran precaución los ábacos correspondientes a $\rho_3 = \infty$ en el caso de curvas de tipo A para las que $\rho_3 \neq \infty$. Se debe valorar de antemano la

magnitud de ρ_3 para tener una idea del error de interpretación.

El método más exacto en la interpretación de curvas de SEV de tipo A en las que $\rho_3 \neq \infty$, es el de utilizar las curvas construidas gráficamente para diferentes valores de ρ_3 y de los restantes parámetros observados en la región que se investiga.

Si en el corte de tipo A, $\rho_3 = \infty$, entonces la interpretación de las curvas, de modo análogo a lo que vimos ocurre en las de tipo H, se facilita por la posibilidad de obtener de los impresos de las curvas los valores S.

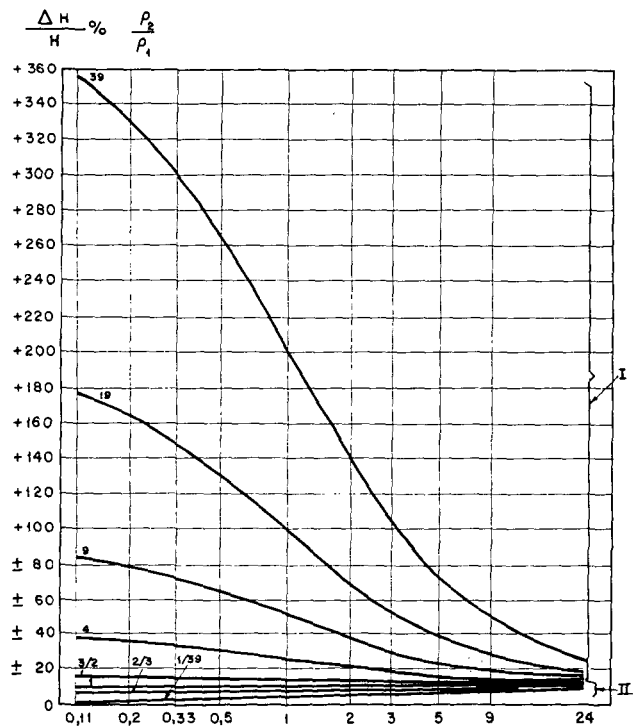
Calculando h_1 , ρ_1 y $S_1 = h_1/\rho_1$, se obtiene $S_2 = S - S_1$ y $h_2 = S_2 \cdot \rho_2$.

La profundidad de la superficie del horizonte de apoyo, si $\rho_3 = \infty$, se puede hallar también mediante el valor de la resistividad media longitudinal ρ_l del corte: $H = S \cdot \rho_l$.

Fig. 163.—
Comparación de los errores de interpretación en curvas de tipo H y A ($\rho_3 = \infty$) para un error en el cálculo de S de $\pm 10\%$.

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{\pm[\rho_2/\rho_1 + h_2/h_1] \cdot 10}{1 + h_2/h_1} \%$$

I.—Curvas de tipo A;
II.—Curvas de tipo H.



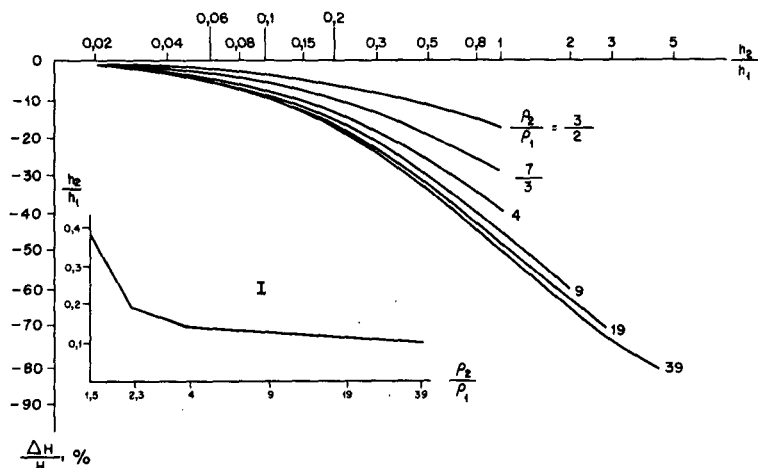
Errores de interpretación originados por errores en la valoración de S, ρ_2 , h_1 y ρ_1

La exactitud en el cálculo de S juega en la interpretación de las curvas de SEV de tipo A un papel mucho mayor que en la de las curvas de tipo H.

El error de interpretación $\Delta H/H$, ligado al error en la evaluación de S puede expresarse, como en el caso de las curvas de tipo H, por la fórmula (39).

En el corte de tipo A es $\rho_2/\rho_1 > 1$. Por tanto, el error crece al aumentar ρ_2/ρ_1 , como se aprecia en el gráfico de la figura 163 construido mediante la fórmula indicada y en el supuesto de que el error en la evaluación de S es de $\pm 10\%$. Al contrario a lo que ocurre en el corte de tipo H, en este caso el error relativo de interpretación es grande; siempre es mayor que el error q cometido en la evaluación de S y crece fuertemente al crecer ρ_2/ρ_1 , en especial para valores pequeños de h_2/h_1 .

Fig. 164.—
Error en la interpretación de curvas de SEV de tres capas de tipo A ($\rho_3 = \infty$) como curva de dos capas, cuando la segunda capa (h_2, ρ_2) no está claramente definida.
1.—Valor máximo de h_2/h_1 para el que se puede despreciar la capa h_2 , interpretando la curva de SEV de tipo A ($\rho_3 = \infty$) como si fuera de dos capas, con error menor de -10% .



Todas las expresiones obtenidas en el examen de los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo H, para el caso de $\rho_3 = \infty$, son aplicables ciertamente también a las curvas de SEV de tipo A. Tan sólo hay que tener en cuenta que en el corte de este tipo siempre es $\rho_2/\rho_1 > 1$.

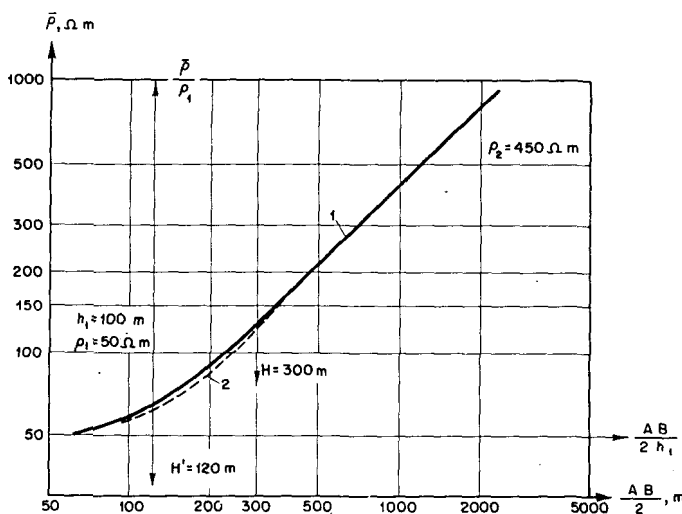
Errores cometidos al interpretar las curvas de SEV de tipo A como de dos capas

Al examinar el mismo caso para las curvas de SEV de tipo H hallábamos la expresión (43) del error relativo de interpretación.

Esta misma fórmula se puede aplicar también a las curvas de SEV de tipo A. Esta fórmula demuestra que en este último caso el error de interpretación será siempre de signo negativo. El mismo crece en valor absoluto al crecer h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . El gráfico del error obtenido por la fórmula citada se muestra en la figura 164. Con su ayuda se obtiene fácilmente el valor máximo de h_2/h_1 , para diferentes valores de ρ_2/ρ_1 , que permite menospreciar la capa h_2 e interpretar la curva de tipo A como de dos capas, con error relativo de interpretación no superior a -10% .

El gráfico evidencia los grandes errores que pueden introducirse en el resultado de la interpretación de las curvas de SEV de tipo A que tienen aspecto de curvas de dos capas. Así, por ejemplo, el corte de tipo A caracterizado por los parámetros $\rho_1 = 50 \text{ ohm.m}$, $\rho_2 = 450 \text{ ohm.m}$, $\rho_3 = \infty$, $h_1 = 100 \text{ m}$, $h_2 = 200 \text{ m}$, $h_3 = \infty$, viene representado por una curva de SEV que no se diferencia de una de dos capas (fig. 165). Su interpretación indica $H' \approx 120 \text{ m}$. Por tanto, el error es de cerca de 180 m, o sea, $\Delta H/H \approx -60\%$. Por consiguiente, en cada caso individual hay que analizar de modo crítico las curvas de SEV que tienen aspecto de curvas de dos capas, antes de hacer su interpretación con auxilio del ábaco de dos capas.

Fig. 165.—Error en la determinación de la profundidad del horizonte de apoyo en la interpretación de curvas de SEV de tres capas de tipo A.
1.—Curva que se interpreta;
2.—Curva del ábaco de dos capas.

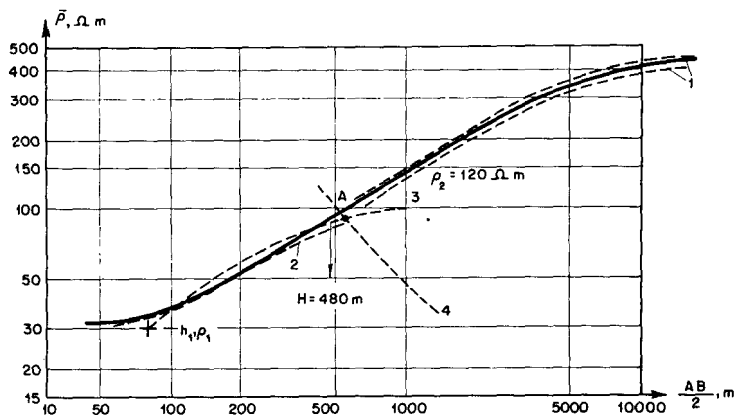


23.2. Interpretación con ayuda del ábaco auxiliar A y del ábaco de dos capas

En la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tres capas de tipo A se utilizan frecuentemente, en lugar de los ábacos de tres capas, el ábaco A y el de dos capas conjuntamente.

Se hallan los valores h_1 y ρ_1 de la curva de SEV (fig. 166) objeto de interpretación y a continuación $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. El impreso con la curva de SEV se superpone al ábaco A de modo que el punto h_1, ρ_1 coincida con el punto inicial del ábaco correspondiente al valor hallado μ_1 (como siempre, los ejes del impreso de SEV y del ábaco deben ser rigurosamente paralelos entre sí). Con el impreso sobre el ábaco se calca en aquél la curva correspondiente al citado μ_1 . Sobre esta curva se hallará el punto A de anisotropía correspondiente a los valores μ_1, ν_1 del corte dado. A continuación y para hallar la posición exacta de este punto A y junto con ella el valor de ν_1 , hacemos uso de nuevo del ábaco de dos capas. El origen de coordenadas de éste se sitúa en la curva del ábaco A calcada anteriormente sobre el impreso de SEV; la gráfica objeto de interpretación se desplaza, observando el paralelismo de los ejes, sin que en ningún momento el origen de coordenadas del ábaco de dos capas quede fuera de la curva μ_1 del ábaco A. Este desplazamiento se continúa hasta que la rama

Fig. 166.—
Interpretación de
curvas de SEV
de tipo A
($\rho_3 \neq \infty$) con los
ábacos A y el de
dos capas.
1 y 2.—Curvas
de dos capas;
3.—Curva μ_1
(ábaco A);
4.—Curva ν_1
(ábaco A).



ascendente de la curva que se interpreta coincida de forma óptima con una de las curvas del ábaco de dos capas. En ese momento el origen de coordenadas del ábaco de dos capas estará situado en el punto A. Se marca el mismo en el impreso de SEV. Sólo queda ahora calcular el valor de ν_1 . Para ello se superpone de nuevo el impreso de SEV sobre el ábaco A del mismo modo que antes, y tomando en el ábaco A, de entre la familia de curvas $\nu_1 = cte.$, la que pasa por el punto A hallado. Conocido ν_1 se deduce $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$ y, por consiguiente, $H = h_1 + h_2$.

En el ejemplo citado, $\rho_2 \approx 120$ ohm.m; la interpretación de la rama izquierda de la curva de SEV con ayuda del ábaco de dos capas da $h_1 = 80$ m; $\rho_1 = 30$ ohm.m y de aquí, $\mu_1 = 4$. La abcisa del punto A es aproximadamente igual a 550 m. Por el punto A pasa la curva $\nu_1 = 5$ del ábaco A. Por tanto, $h_2 = \nu_1 \cdot 80 = 400$ m; $H = 480$ m.

La posibilidad de aplicación de este método de interpretación, para las curvas de SEV de tipo A, sin grandes errores es bastante escasa. El análisis del problema demuestra que siendo el error principalmente de signo positivo, crece rápidamente al decrecer h_2/h_1 , sobre todo para valores grandes de ρ_2/ρ_1 . Así para $h_2/h_1 = 2$ y $\rho_2/\rho_1 = 9$ ($\rho_3 = \infty$) el error llega a +20%; al aumentar ρ_2/ρ_1 a 19, el error se hace ya de más de +40%. Si se quiere que el error de interpretación no exceda de +10%, entonces hay que llegar a la conclusión de que él sólo es aplicable desde los siguientes valores mínimos de ρ_2/ρ_1 y máximos de ρ_2/ρ_1 para $\rho_3 = \infty$:

Para ρ_2/ρ_1	h_2/h_1 (mín)	Para h_2/h_1	ρ_2/ρ_1 (máx)
1,5	0,1	1	5
4	0,5	2	7
9	2,5	3	10
19	7	5	15
39	12	9	30

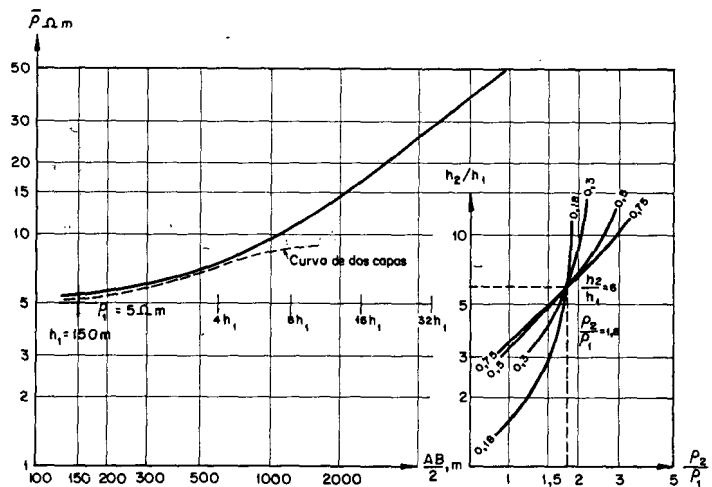
Para $\rho_3 \neq \infty$, la posibilidad de aplicación del método de interpretación indicado aumenta algo. Por ejemplo, en el caso de $\rho_2/\rho_1 = 9$ y $\rho_3/\rho_1 = 81$, el método puede aplicarse a partir de $h_2/h_1 = 1$; para $\rho_2/\rho_1 = 19$ y $\rho_3/\rho_1 = 82$, a partir de $h_2/h_1 = 5$, etc.

El error de interpretación al utilizar el ábaco A y el de las curvas de dos capas, junto con el error cometido en el cálculo de los parámetros iniciales del corte (h_1, ρ_1, ρ_2) puede estimarse de modo aproximado con ayuda de las fórmulas obtenidas anteriormente para las curvas de SEV de tipo H.

23.3. Interpretación con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov

Ya hemos tratado anteriormente sobre los procedimientos generales de utilización de los nomogramas de A. I. Bogdanov. Veremos, por tanto, ahora tan sólo un ejemplo práctico de interpretación de una curva de SEV de tipo A para $\rho_3 \neq \infty$, llevada hasta separaciones $AB=20$ km y cuya gráfica ofrece un carácter monótono (fig. 167).

Fig. 167.— Interpretación de las curvas de SEV de tipo A ($\rho_3 \neq \infty$) con los nomogramas de A. I. Bogdanov. Nomograma 15 ($\log \rho_3/\rho_1 = 1,25$).



Mediante el ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 150$ m, $\rho_1 = 5$ ohm.m. Sea $\rho_3 \approx 75$ ohm.m. Tomando en la curva de SEV los valores de $\bar{\rho}$ para las semiseparaciones $AB/2$ de los nomogramas, tenemos:

$AB/2$ (m)	$\bar{\rho}$ (ohm.m)	$\bar{\rho}/\rho_1$	$\log(\bar{\rho}/\rho_1)$
600	7,5	1,5	0,18
1200	10	2	0,30
2400	16	3,2	0,50
4800	29	5,8	0,75

Teniendo en cuenta que $\rho_3/\rho_1 \approx 15$, será $\log(\rho_3/\rho_1) = 1,18$. Tomamos el nomograma más próximo al valor de $\log(\rho_3/\rho_1)$ hallado. Este será el nomograma 15 ($\log[\rho_3/\rho_1] = 1,25$; tabla 8). Las cuatro curvas del mismo para los valores de $\log(\bar{\rho}/\rho_1)$ coinciden casi en un punto. Las coordenadas de este punto son: $h_2/h_1 = 6$, $\rho_2/\rho_1 = 1,8$, de donde $h_2 = 900$ m, $\rho_2 = 9$ ohm.m, para $\rho_3 \approx 90$ ohm.m. El posible error de interpretación es en este caso menor que ± 10 a 15% .

23.4. Interpretación por el punto de separación

Los fundamentos de este método de interpretación aproximada se han expuesto anteriormente al examinar las curvas de SEV de tipo H.

La profundidad H de la superficie del horizonte de apoyo ($\rho_3 = \infty$) para las curvas de SEV de tres capas de tipo A, se calcula por la fórmula (45):

$$H = x/2q$$

en la que x es la abscisa del punto de separación; q , un coeficiente que depende de los valores de μ_1 y ν_1 y que, en contraposición a lo que ocurre en el corte de tipo H, es menor que la unidad. Como se aprecia por el examen de las curvas calculadas de SEV, este coeficiente q disminuye al crecer μ_1 (fig. 138, II) y al aumentar ν_1 hasta 2—3; al seguir aumentando ν_1 , el coeficiente crece y llega a ser 1 para $\nu_1 \approx 5$, no variando con aumentos mayores.

Si $\nu_1 = h_2/h_1 \geq 5$, entonces para μ_1 cualquiera, se puede calcular el valor de H con suficiente exactitud, considerándolo igual a $x/2$. Para ν_1 menor este método de interpretación conduce a valores de H disminuidos en tanta mayor proporción cuanto mayor sea ρ_2/ρ_1 y menor h_2/h_1 (hasta $h_2/h_1 \geq 2$; al seguir decreciendo h_2/h_1 , el error disminuye).

Hay que hacer constar, además, que el error de interpretación será pequeño también en el caso de $\mu_1 \leq 4$ para h_2/h_1 cualquiera.

23.5. Interpretación por el método de comparación con curvas de SEV experimentales

Como en el caso del corte del tipo H, las curvas de tipo A se pueden interpretar por el método de comparación (fig. 168) sólo entre límites bien definidos de variación de los parámetros. El análisis de los resultados de la interpretación cuantitativa de las curvas teóricas de SEV de tipo A ($\rho_3 = \infty$) realizado por D. P. Fedorov indica que sólo en el caso de valores constantes y pequeños de ρ_2/ρ_1 ($\rho_2/\rho_1 \approx 1,5$ a 2) se pueden obtener por el método de comparación valores más o menos reales de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo para una gama de variación de h_2/h_1 relativamente amplia.

Al aumentar ρ_2/ρ_1 , el error de interpretación por este método crece de modo tan ostensible que excluye la posibilidad de su aplicación en la práctica.

CURVAS DE SEV DE TIPO K

Como ya hemos indicado, las curvas de SEV de tipo K caracterizan el corte geoelectrico de tres capas en el que una capa de resistividad elevada está situada entre otras dos más conductoras. En la figura 169 se tiene un caso típico de corte eléctrico de tipo K y la correspondiente curva de SEV.

Fig. 168.—
Interpretación
de curvas de SEV
de tipo A
mediante
comparación con
curvas prácticas
de SEV.
1.—Curva de SEV
que se interpreta;
2.—Curva de SEV
calibrada;
3.—Profundidad
verdadera H de la
superficie del
horizonte de
apoyo;
4.—Profundidad
de la superficie
del horizonte
de apoyo H'
calculada por los
resultados de la
interpretación por
el método de
comparación con
curvas calibradas
de SEV.

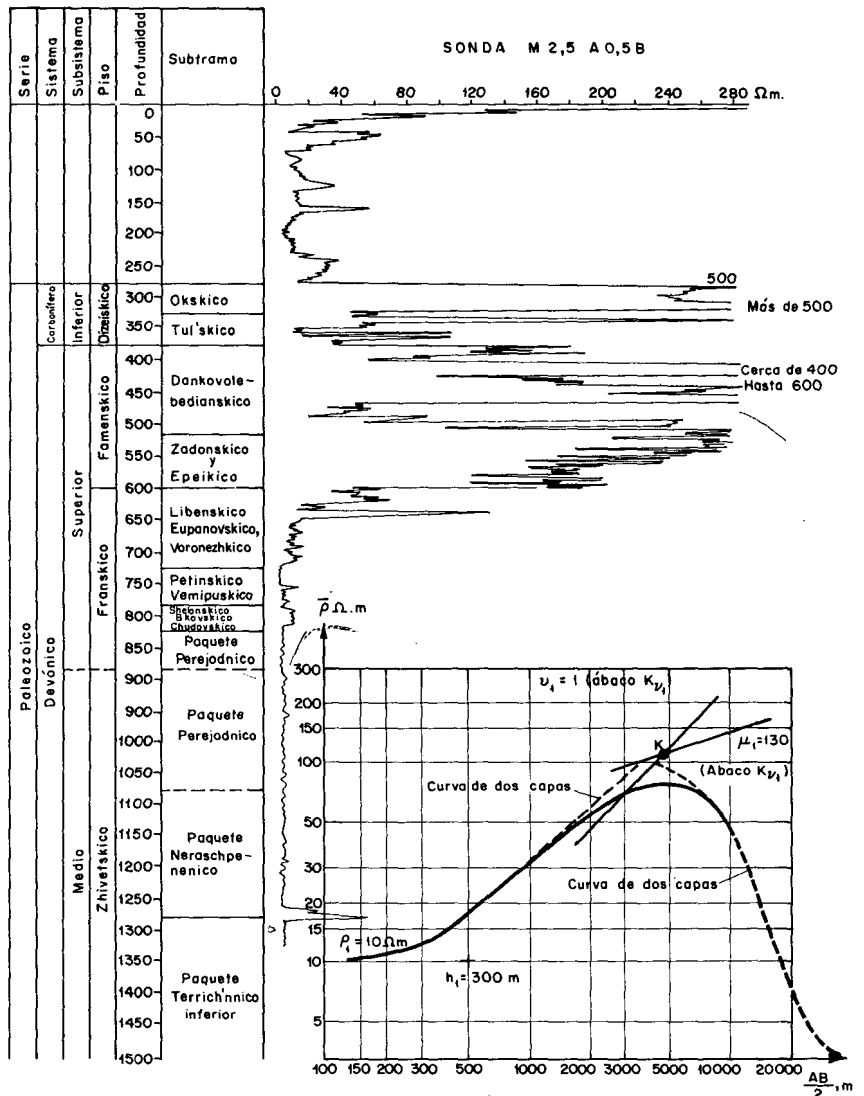
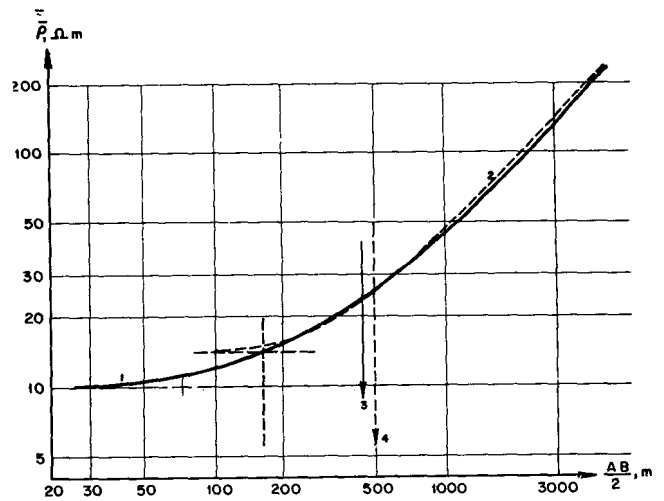


Fig. 169.—Corte
geoelectrico de
tipo K y curva SEV
correspondiente
al mismo.

Existen, reunidos en ábacos, una serie de curvas de SEV de tres capas de tipo K calculadas para los parámetros del corte $\rho_2/\rho_1 = 3/2; 7/3; 4; 19; 39$ y $\rho_3/\rho_1 = 0; 1; (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$. Los parámetros h_2/h_1 , son los mismos que en el caso de los restantes tipos de curvas de SEV de tres capas. Recordemos el número de ábacos en que se agrupan las curvas de SEV de tipo K al variar el parámetro ν_1 :

$$87 - 92 \quad (\rho_3/\rho_1 = 0); \quad 57 - 62 \quad (\rho_3/\rho_1 = 1);$$

$$421 - 426 \quad [\rho_3/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}]$$

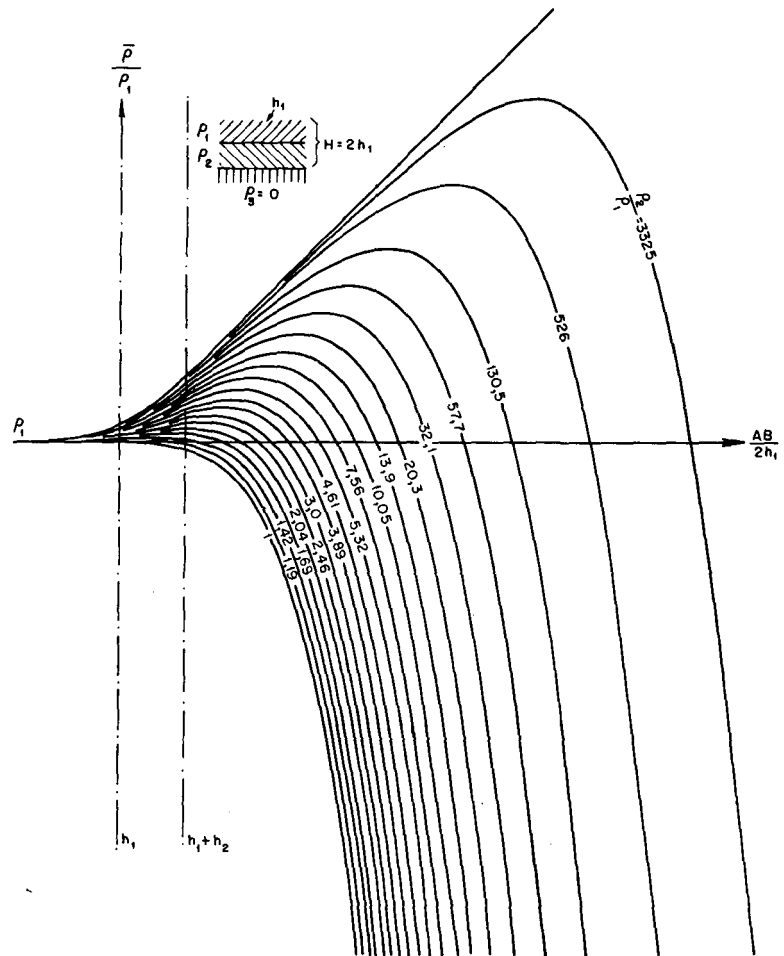


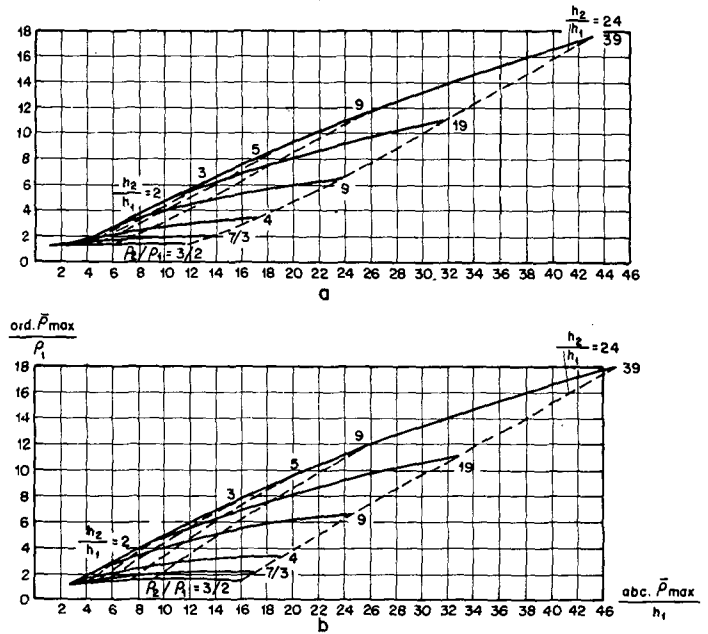
Fig. 170.—
Abaco 309

Hay todavía otro ábaco de tipo K que no está incluido en la serie anterior. Es el ábaco 309 que comprende curvas calculadas para $h_2/h_1 = 1$, $\rho_3 = 0$ y ρ_2/ρ_1 variable desde 1 a 3325 (fig. 170). Este ábaco da una idea de la forma de las curvas de SEV para el caso en que la capa intermedia tiene una resistividad muy grande y un espesor muy reducido y descansa sobre una roca muy conductora.

Las curvas calculadas permiten sin especial dificultad obtener gráficamente ábacos de curvas de SEV de tres capas de tipo K para cortes con parámetros cualesquiera.

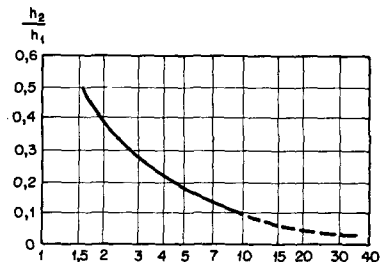
24. Variación de la posición del punto máximo en las curvas de SEV en función de los parámetros del corte

Una característica especial de las curvas de SEV de tres capas de tipo K es la existencia en ellas de un valor máximo de $\bar{\rho}$. Las coordenadas de este máximo de $\bar{\rho}$ están estrechamente ligadas con el espesor y la resistividad relativos de la segunda capa. Los gráficos de la figura 171 ponen de manifiesto la relación existente entre los valores de la abscisa y ordenada del punto $\bar{\rho}_{max}$ de la curva de SEV para diferentes parámetros del corte. En estos gráficos se observa que, en caso de h_2/h_1 grande, a cada par de valores de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , corresponde su posición del punto $\bar{\rho}_{max}$. Esto no se observa para h_2/h_1 pequeño ($h_2/h_1 \leq 2$), cuando en el corte de tipo K es aplicable el principio de equivalencia y para los diferentes valores de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 se mantiene la relación $\mu_1 \cdot \nu_1 = cte.$; en tal caso la posición de $\bar{\rho}_{max}$ permanece invariable.



En la figura 172 se tiene un gráfico que da aproximadamente para diferentes ρ_2/ρ_1 y $\rho_3=0$, los valores máximos de h_2/h_1 , para los que la segunda capa no se señala en la rama ascendente de la curva de SEV, teniendo ésta la forma de una curva de dos capas.

Fig. 172.—Valor máximo aproximado de h_2/h_1 , para el que la segunda capa aún no se refleja en la curva de SEV de tipo K ($\rho_3=0$).

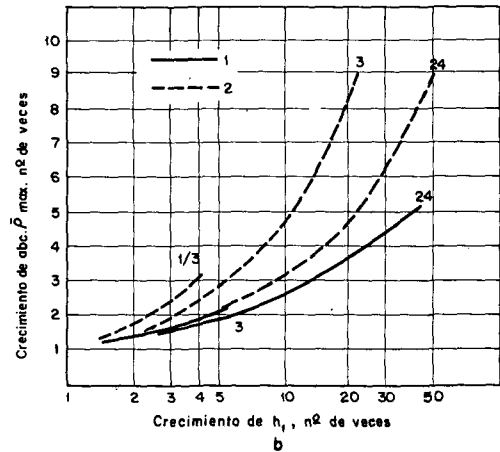
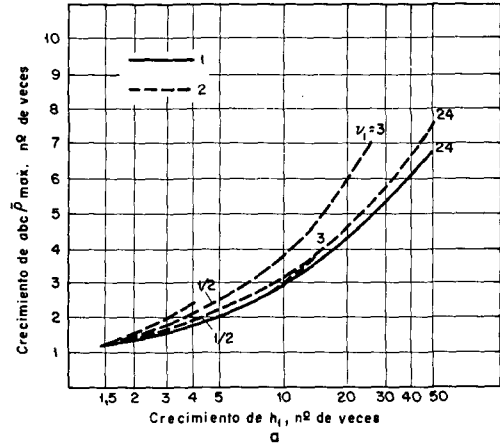


La posición del punto máximo de la curva de SEV de tipo K se utiliza con frecuencia para su interpretación cualitativa, para sacar conclusiones aproximadas sobre la variación de los

parámetros de la segunda capa del corte y sobre la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo. Veamos la influencia de la variación de los parámetros h_1 , ρ_1 , h_2 , ρ_2 en la posición del punto $\bar{\rho}_{max}$.

Fig. 173.—
Influencia de la
variación de h_1
en la abcisa de

- $\bar{\rho}_{max}$.
a.— $\rho_2/\rho_1 = 39$;
b.— $\rho_2/\rho_1 = 4$.
1.— $\rho_3/\rho_1 = 0$;
2.— $\rho_3/\rho_1 = 1$.



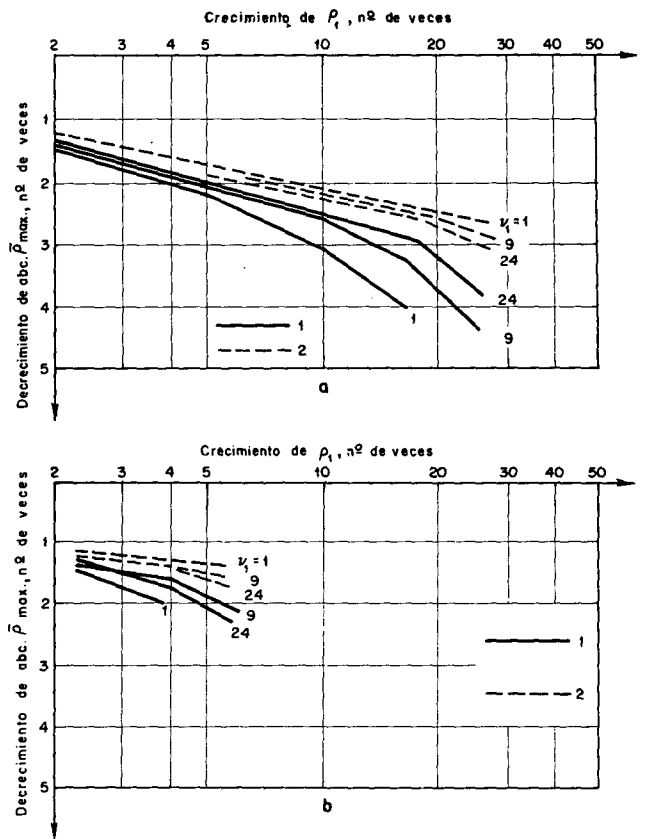
24.1. Variación de la abcisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ en función de la variación de h_1 y ρ_1

El estudio de las curvas calculadas de SEV indica que el crecimiento de h_1 lleva consigo el crecimiento de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$.

En la figura 173 se muestran unos gráficos, presentados a modo de ejemplo, que señalan esta dependnecia para $\rho_2/\rho_1 = 4$ y 39 , $\rho_3/\rho_1 = 0$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$.

El examen demuestra también que al crecer ρ_1 la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ disminuye (fig. 174).

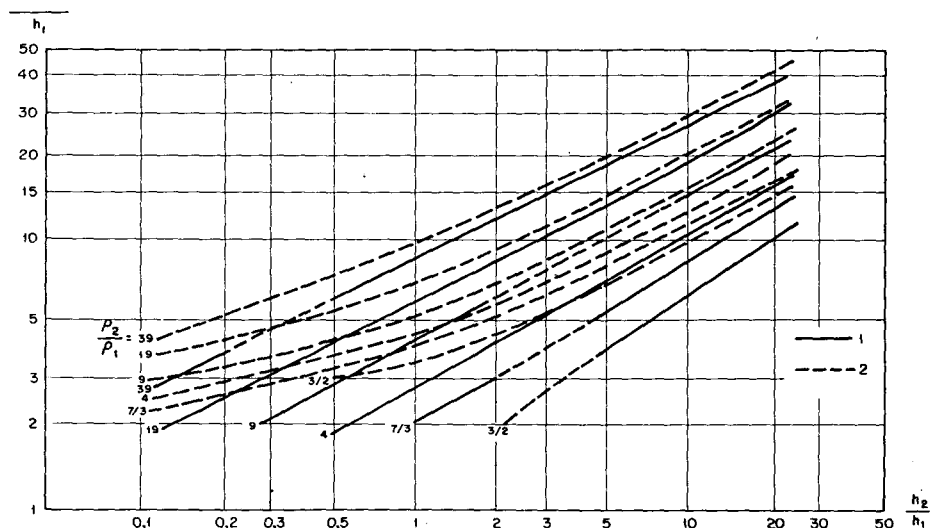
Comparando la dependencia de la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ de los valores de h_1 y ρ_1 se comprueba que la variación de estos parámetros en el mismo sentido influye en la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en un valor numéricamente casi igual, pero de signo opuesto. De ello se deduce que el aumento o disminución simultáneo de h_1 y ρ_1 en el mismo número de veces en general se refleja débilmente en la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$. Esta influencia es especialmente pequeña para valores iniciales de ρ_2/ρ_1 grandes.



24.2. Variación de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ en función de la variación de h_2 , $h_1 + h_2$, ρ_2 y ρ_3

Al aumentar h_2 permaneciendo invariable h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , la abscisa de $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K, aumenta. Este aumento es tanto mayor cuanto mayor sea el valor inicial de ρ_2/ρ_1 y de ρ_3/ρ_1 (fig. 175).

La abscisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K crece con el aumento de h_1 y h_2 . Es interesante señalar que la influencia del aumento de cada uno de estos parámetros en el caso de $h_2/h_1 \geq 1$ es aproximadamente igual.



Hay que indicar también que el crecimiento de h_2 influye más en la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en el corte de tipo K que en la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en el corte de tipo H (figs. 81 y 175). La diferencia es especialmente visible si la resistividad de la segunda capa difiere en ambos cortes bastante respecto a la resistividad de la primera. Sea, por ejemplo, el caso de dos curvas de tipo K y H correspondientes a los cortes con las siguientes relaciones de parámetros:

- 1) $\mu_1 = 39$, $\nu_1 = 1$, $\rho_3 = 0$
- 2) $\mu_1 = 1/39$, $\nu_1 = 1$, $\rho_3 = 0$

Al crecer en ambos casos el espesor de h_2 en cinco veces (fig. 176), la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ crece 2,25 veces y la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ sólo en 1,36 veces. Esta propiedad de las curvas de SEV de tipo K permite, mejor que en las curvas tipo H, seguir cualitativamente la variación de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo.

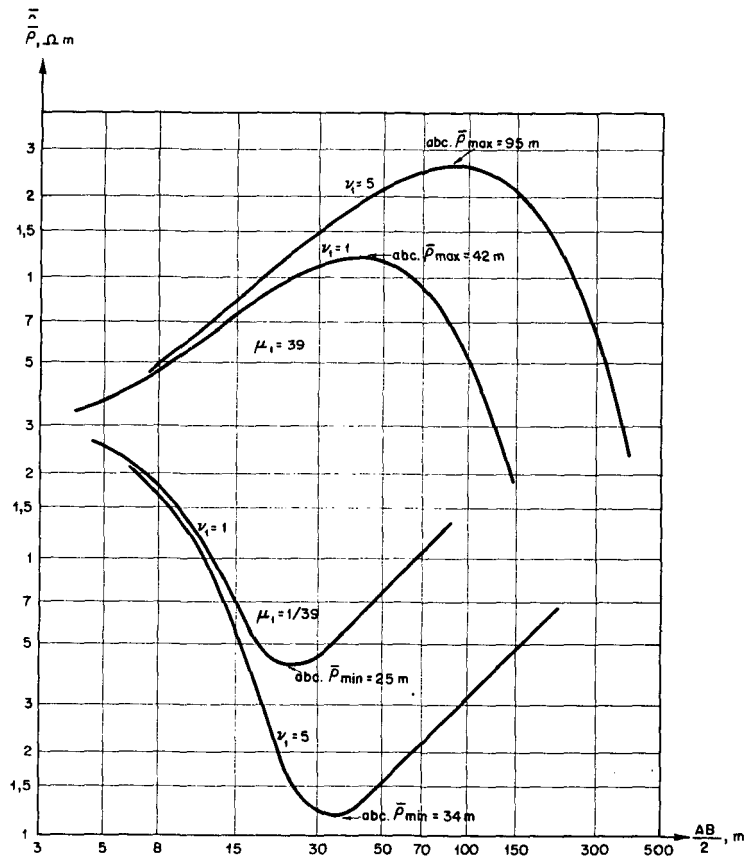
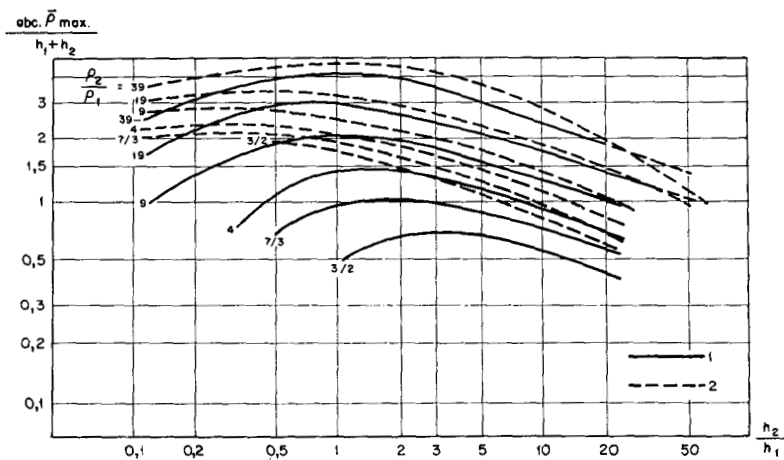


Fig. 176.—
Comparación de la influencia del crecimiento de h_2 en la abcisa de los puntos extremales de las curvas de SEV de tipo K y H.

Intentemos ver en qué proporción se encuentra la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV de tipo K y la profundidad del horizonte de apoyo. El estudio de las curvas calculadas de SEV demuestra que en la mayoría de los casos la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ es mayor que H. Ella excede a ésta tanto más cuanto mayor sea ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 , y menor h_2/h_1 (fig. 177). Por ejemplo, para $\mu_1 = 39$, $\nu_1 = 1$ a 2 y $\rho_3 = 0$, la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ pasa de 3H.

Fig. 177.—
Curvas de SEV
de tipo K.
Dependencia
de abc.
 $\bar{\rho}_{max}/(h_1+h_2)$
de h_2/h_1 , para
 $\rho_2/\rho_1 = cte.$
1.— $\rho_3 = 0$;
2.— $\rho_3/\rho_1 = 1$.



Para algunas proporciones de los parámetros del corte, la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ es numéricamente igual a la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo en el punto de SEV dado. Estas proporciones, que tienen interés práctico, se obtienen con facilidad gráficamente; se dan en la tabla 33 en la que se figuran los valores de h_2/h_1 para los que la abcisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K se puede tomar igual a la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo.

Como vemos, sólo para valores grandes de h_2/h_1 , especialmente en caso de ρ_2/ρ_1 muy grande, se puede suponer la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo igual al valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K.

La abcisa de $\bar{\rho}_{max}$, para otros parámetros del corte constantes, aumenta al crecer ρ_2 (fig. 178).

Fig. 178.—Curvas
de SEV de tipo K.
Dependencia de
abc. $\bar{\rho}_{max.}/$
 (h_1+h_2)
de h_2/h_1 , para
 $\rho_2/\rho_1 = cte.$
1.— $\rho_3 = 0$;
2.— $\rho_3/\rho_1 = 1$.

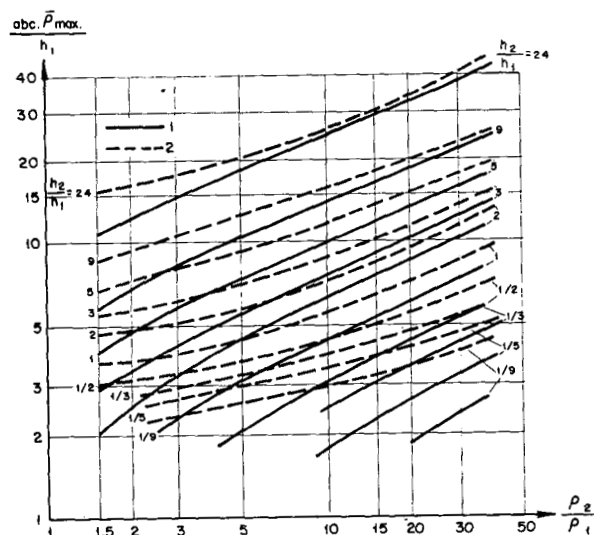


TABLA 33

VALORES DE h_2/h_1 PARA LOS QUE LA ABCISA DE $\bar{\rho}_{max}$ EN LAS CURVAS DE SEV DE TIPO K, ES IGUAL NUMERICAMENTE A LA PROFUNDIDAD DE LA SUPERFICIE DEL HORIZONTE DE APOYO EN EL PUNTO DE SEV

μ_1	Valores de h_2/h_1		
	Para $\rho_3/\rho_1=0$	Para $\rho_3/\rho_1=1$	Para $\rho_3/\rho_1=(\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
39	> 100	≈ 50	> 100
19	≈ 50	≈ 50	≈ 70
9	0,12; 20	23	35
4	0,42; 7,5	13	21
7/3	1—2	9	14
3/2	—	6	11

En la tabla 34 se figuran datos comparativos de la influencia de la resistividad de la primera y segunda capa en el valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV.

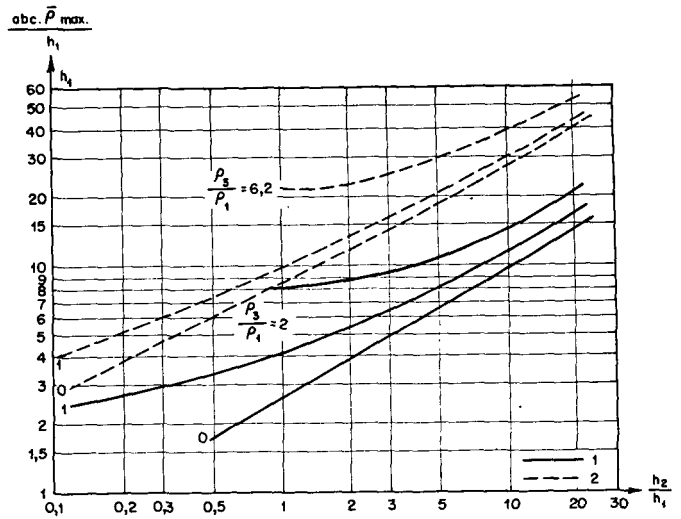
En dicha tabla se observa que para los mismos parámetros iniciales del corte en el caso de $h_2/h_1 \geq 1$, la influencia del valor de ρ_2 en la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ es mayor que la influencia de la magnitud ρ_1 , para relativamente grandes valores iniciales de ρ_2/ρ_1 (por ejemplo, $\rho_2/\rho_1=9$). En caso de ρ_2/ρ_1 relativamente pequeño ($\rho_2/\rho_1 \leq 4$), la variación de ρ_1 influye algo más la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$.

TABLA 34

COMPARACION DE LA INFLUENCIA DE LOS VALORES DE ρ_1 Y ρ_2 EN LA ABCISA DE $\bar{\rho}_{max}$

Parámetros iniciales			Crecimiento de ρ_1 en cuatro veces	Crecimiento de ρ_2 en cuatro veces
μ_1	ρ_3/ρ_1	ν_1	Disminución de la de la abc. $\bar{\rho}_{max}$, núm. de veces	Aumento de abc. $\bar{\rho}_{max}$, núm. de veces
9	0	24	1,7	1,8
		9	1,7	1,9
		3	1,9	2,0
		1	2,4	2,0
4	0	24	2,0	1,7
		9	2,1	1,8
		3	2,1	1,9
9	1	24	1,5	1,8
		9	1,3	1,9
		3	1,2	2,0
		1	1,4	2,0
4	1	24	1,5	1,5
		9	1,7	1,6
		3	1,7	1,6
		1	—	1,7

Fig. 179.—Curvas de SEV de tipo K. Dependencia de abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ de ρ_3/ρ_1 y h_2/h_1 para $\rho_2/\rho_1 = cte.$
 1.— $\rho_2/\rho_1 = 4;$
 2.— $\rho_2/\rho_1 = 39.$



Al crecer ρ_3 , con los restantes parámetros del corte constantes, la abscisa de $\bar{\rho}_{max}$ crece (fig. 179).

24.3. Dependencia de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ de la resistencia transversal T_2 de la capa intermedia del corte

Con ayuda del ábaco 309 (fig. 170) y de curvas construidas gráficamente, A. M. Zagarmistr encontró que para valores muy grandes de ρ_2/ρ_1 y, según parece, para cualquier valor de h_2/h_1 , se conserva una relación lineal entre la variación de abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ y ρ_2/ρ_1 (fig. 180). Además, resulta que el valor de abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ prácticamente no depende de las relaciones h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 de los parámetros del corte de tipo K, si T_2/T_1 es constante. Al variar T_2/T_1 , también varía la magnitud abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ según una ley lineal (fig. 181). Por consiguiente, se deduce que para definir la magnitud de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K es suficiente conocer en el corte, además de h_1 y ρ_1 , el valor T_2 .

Fig. 180.—Curvas de SEV de tipo K. $\rho_3 = 0.$ Dependencia de abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ de ρ_2/ρ_1 , para $h_2/h_1 = cte.$ (Según A. M. Zagarmistr.)

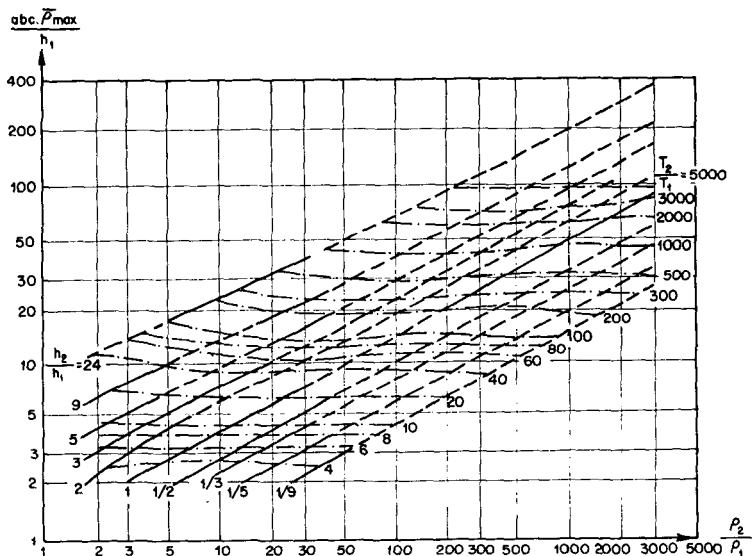
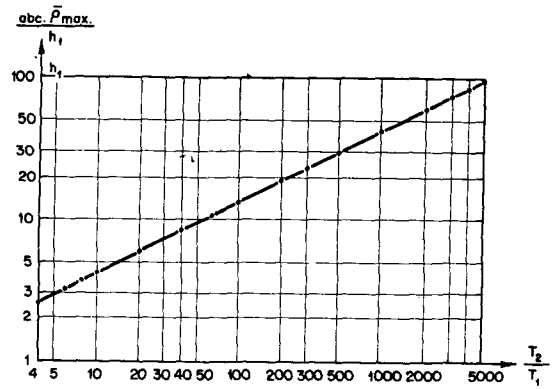


Fig. 181.—Curvas de SEV de tipo K.
 $\rho_3 = 0$.
 Dependencia de abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1$ de T_2/T_1 . (Según A. M. Zagarmistr.)



24.4. Proporción entre la abcisa del punto K y la del punto $\bar{\rho}_{max}$

En la interpretación de las curvas de SEV de tipo K es útil a veces conocer la relación existente entre el punto $\bar{\rho}_{max}$ y el punto K, cuyas coordenadas definen el espesor y resistividad de una capa ficticia equivalente al conjunto de las dos capas superiores del corte.

Con ayuda del ábaco K y de las curvas calculadas de SEV es fácil hallar la relación existente entre la magnitud de la abcisa del punto K y de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ para valores diferentes de h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 , $\rho_3/\rho_1 = 0$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$. Estos datos figuran resumidos en la tabla 35.

TABLA 35

RELACION ENTRE LA ABCISA DEL PUNTO K Y LA ABCISA DEL PUNTO $\bar{\rho}_{max}$ EN LAS CURVAS DE SEV DE TIPO K PARA DIFERENTES PARAMETROS DEL CORTE

μ_1	Valores de ν_1							
	ρ_3/ρ_1	0,5	1	2	3	4	9	24
3/2	0	—	—	1,65	1,52	1,57	1,82	2,28
	1	0,54	0,66	0,74	0,89	0,92	1,20	1,67
4	0	1,22	1,14	1,13	1,18	1,22	1,25	1,59
	1	0,64	0,76	0,80	0,86	0,96	1,06	1,38
9	0	1,11	1,07	1,05	1,10	1,11	1,15	1,25
	1	0,80	0,88	0,93	0,99	0,95	1,03	1,21
19	0	1,10	1,11	1,12	1,10	1,12	1,10	1,19
	1	0,85	0,93	1,0	1,0	1,0	1,05	1,15
39	0	1,08	1,07	1,06	1,11	1,17	1,12	1,14
	1	0,93	0,96	0,97	1,03	1,08	1,12	1,09

Como se aprecia en la tabla 35, en caso de $\rho_3 = 0$ se observa un desplazamiento mayor del punto K respecto al punto $\bar{\rho}_{max}$ en el eje de abcisas hacia la derecha para ρ_2/ρ_1 pequeño. Este desplazamiento aumenta al crecer h_2/h_1 , si $\nu_1 \geq 3$.

Para $\rho_3/\rho_1 = 1$, el punto K, en algunos casos, está situado a la izquierda del punto $\bar{\rho}_{max}$.

En general se puede considerar que para $\rho_2/\rho_1 \geq 9$ y $h_2/h_1 \leq 10$ el desplazamiento del punto K en el eje de abscisas respecto al punto $\bar{\rho}_{max}$ no excede del 10 al 15% del valor de la abscisa de $\bar{\rho}_{max}$. Para éste, en caso de $\rho_3=0$, el punto K siempre queda a la derecha del punto de $\bar{\rho}_{max}$.

24.5. Variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{max}$ en función de la variación de h_1 y ρ_1

El valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ disminuye al aumentar h_1 y aumenta al crecer ρ_1 (figs. 182 y 183).

Fig. 182.— Influencia de la variación de h_1 en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

- a. $-\rho_2/\rho_1 = 39$;
- b. $-\rho_2/\rho_1 = 4$.
- 1. $-\rho_3/\rho_1 = 0$;
- 2. $-\rho_3/\rho_1 = 1$.

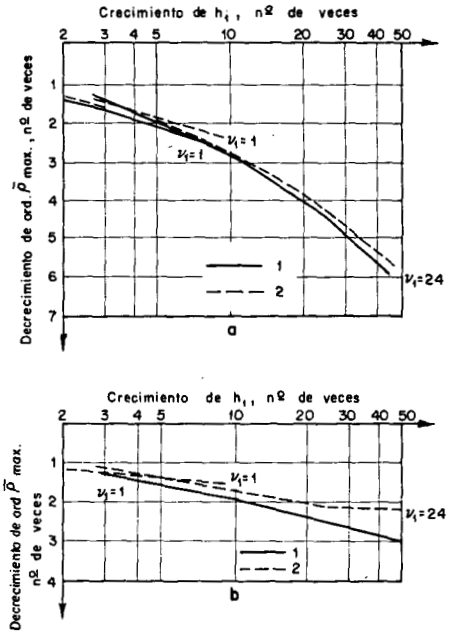
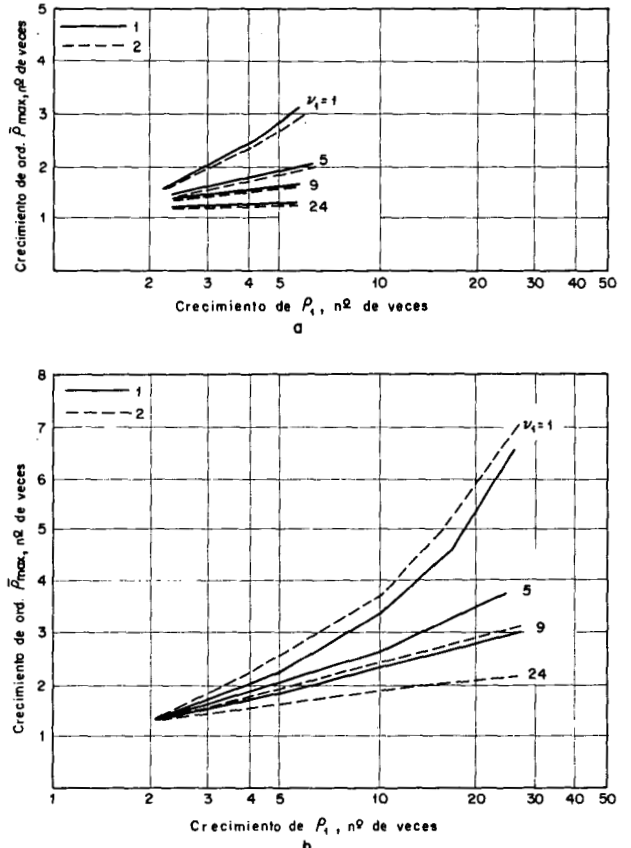


Fig. 183.— Influencia de la variación de ρ_1 en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

- a. $-\rho_2/\rho_1 = 9$;
- b. $-\rho_2/\rho_1 = 39$.
- 1. $-\rho_3/\rho_1 = 0$;
- 2. $-\rho_3/\rho_1 = 1$.



Por consiguiente en el corte de tipo K, el aumento o disminución simultánea de los valores de h_1 y ρ_1 , puede conducir a variaciones opuestas de $\bar{\rho}_{max}$.

Al comparar entre sí la influencia de la variación de h_1 y ρ_1 en la magnitud de la abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{max}$, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

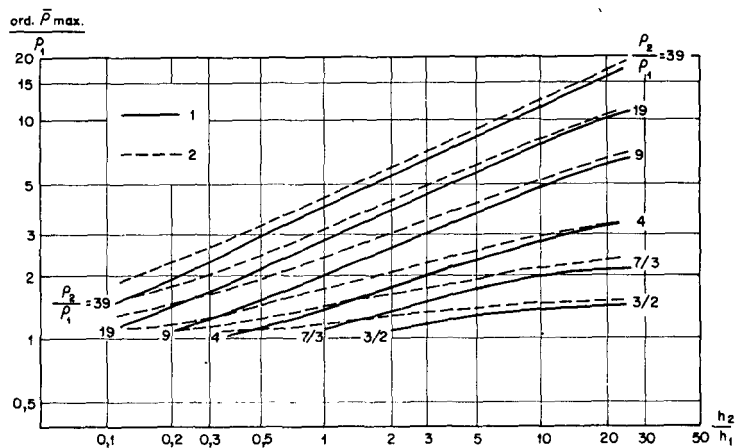
- 1) Al aumentar h_1 , la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ aumenta y la ordenada disminuye. En este caso, el crecimiento de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ es más intenso que el correspondiente decrecimiento de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$, sobre todo, para valores iniciales de ρ_2/ρ_1 relativamente pequeños.
- 2) Al aumentar ρ_1 , la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ disminuye y la ordenada aumenta. En caso de valores iniciales de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 relativamente grandes la disminución de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ es mucho más acusada que el aumento de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

24.6. Variación de la ordenada del punto $\bar{\rho}_{max}$ en función de la variación de h_2, ρ_2, ρ_3

El examen de las curvas calculadas de SEV de tipo K indica que al aumentar h_2 crece la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$. Para valores constantes de h_2/h_1 y de ρ_1 , el valor de $\bar{\rho}_{max}$ será tanto mayor cuanto mayor sea el valor de ρ_2 y ρ_3 (fig. 184).

La variación simultánea y del mismo valor de h_1 y h_2 no produce gran influencia en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

Fig. 184.—Curvas de SEV de tipo K. Dependencia de ord. $\bar{\rho}_{max}/\rho_1$ de h_2/h_1 para $\rho_2/\rho_1 = cte.$
 1.— $\rho_3 = 0$;
 2.— $\rho_3 = 1$.



El aumento de ρ_2 también provoca el aumento de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ (fig. 185). Para valores dados de ρ_2 y ρ_1 la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ es tanto mayor cuanto mayores sean los valores de h_2/h_1 y ρ_3/ρ_1 .

La intensidad del crecimiento de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ con el aumento de ρ_2 , para valores constantes de los restantes parámetros disminuye al decrecer h_2/h_1 ; aumenta al decrecer ρ_2/ρ_1 para h_2/h_1 suficientemente grande (h_2/h_1 de 24 a 3); permanece constante o baja algo para h_2/h_1 pequeño; y permanece casi constante al variar ρ_3/ρ_1 (fig. 186).

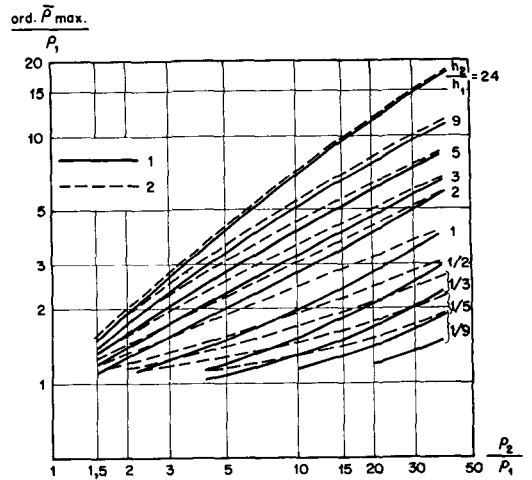


Fig. 185.—Curvas de SEV de tipo K. Dependencia de ord. $\bar{\rho}_{max} / \rho_1$ de ρ_2 / ρ_1 para $h_2 / h_1 = cte.$
 1.— $\rho_3 = 0$;
 2.— $\rho_3 = 1$.

El valor de $\bar{\rho}_{max}$, por tanto, crece al crecer ρ_1 y ρ_2 . En la tabla 36 se compara la influencia de la variación de estos parámetros en la magnitud $\bar{\rho}_{max}$.

TABLA 36

COMPARACION DE LA INFLUENCIA DE LA VARIACION DE ρ_1 Y ρ_2 EN LA ORDENADA DE $\bar{\rho}_{max}$

Parametros iniciales			Crecimiento en dos veces		Crecimiento en cuatro veces	
μ_1	ρ_3 / ρ_1	ν_1	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2
			Crecimiento de ord. $\bar{\rho}_{max}$ n.º de veces		Crecimiento de ord. $\bar{\rho}_{max}$ n.º de veces	
9	0	1/2	1,5	1,4	2,9	1,9
		1	1,5	1,4	2,4	1,9
		3	1,4	1,4	1,9	2,0
		9	1,3	1,5	1,5	2,1
		20	1,1	1,5	1,2	2,2
4	0	1/2	1,8	1,3	2,9	1,7
		1	1,6	1,4	2,5	1,9
		3	1,3	1,6	1,7	2,1
		9	1,1	1,7	1,3	2,4
		24	1,1	1,9	1,1	2,9

En dicha tabla 36 se ve que para $\mu_1 = 9$ y 4 (para valores mayores de μ_1 no se ha realizado investigación alguna) la influencia predominante en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$, en caso de $h_2 / h_1 \leq 1$, la tiene el crecimiento de ρ_1 . Para $h_2 / h_1 > 1$ la mayor influencia resulta del crecimiento de ρ_2 . Esta influencia se intensifica con valores bajos de ρ_2 / ρ_1 .

$\bar{\rho}_{max}$ crece no sólo al crecer ρ_2 , sino también al crecer h_2 . La influencia predominante en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$, a igualdad de las restantes condiciones, resulta de la variación del parámetro ρ_2 .

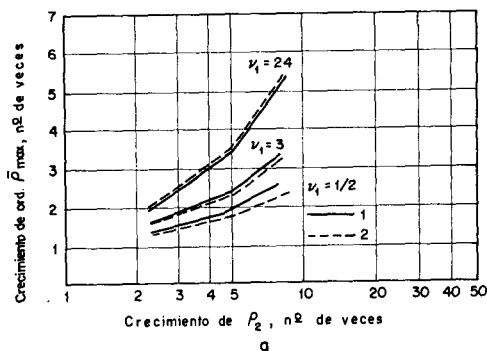
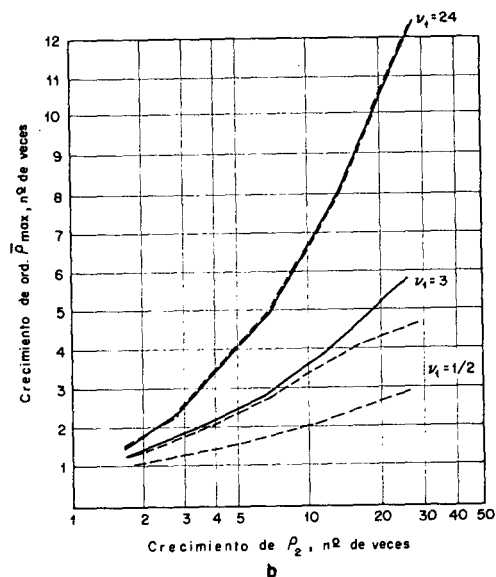


Fig. 186.—
Influencia de la
variación de ρ_2
en la ordenada
de $\bar{\rho}_{max}$.
a.— $\rho_2/\rho_1=4$;
b.— $\rho_2/\rho_1=3/2$.
1.— $\rho_3/\rho_1=0$;
2.— $\rho_3/\rho_1=1$.



El valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ es siempre menor que ρ_2 . Si ρ_2/ρ_1 es grande, entonces no es posible considerar $\rho_2 = \text{ord. } \bar{\rho}_{max}$ incluso para valores grandes de h_2/h_1 .

En el gráfico de la figura 187 se expresa la variación de la relación $\text{ord. } \bar{\rho}_{max}/\rho_2$ en función de los diferentes parámetros del corte de tipo K, para $\rho_3/\rho_1=0$ y $\rho_3/\rho_1=1$. Sólo para valores pequeños de ρ_2/ρ_1 ($\rho_2/\rho_1 \approx 2$ a $1,5$) y grandes de h_2/h_1 ($h_2/h_1 \geq 20$) el valor de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ queda próximo al valor de ρ_2 (se diferencia del mismo en un 5 a 10%).

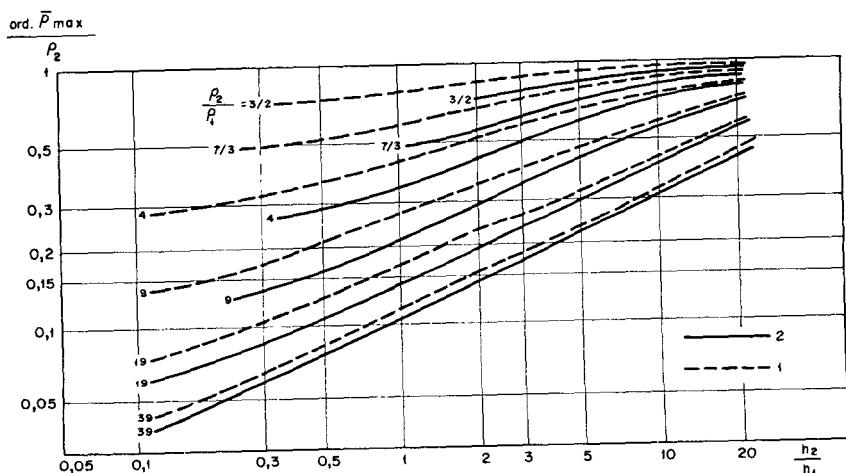


Fig. 187.—Curvas
de SEV de tipo K.
Dependencia de
ord. $\bar{\rho}_{max}/\rho_2$
de h_2/h_1 , para
 $\rho_2/\rho_1 = \text{cte.}$
1.— $\rho_3=0$;
2.— $\rho_3=1$.

Para la interpretación de las curvas de SEV de tipo K es de interés conocer la relación mínima entre h_2/h_1 , para un valor dado de ρ_2/ρ_1 , de modo que una variación de ρ_3 no tenga influencia visible en la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

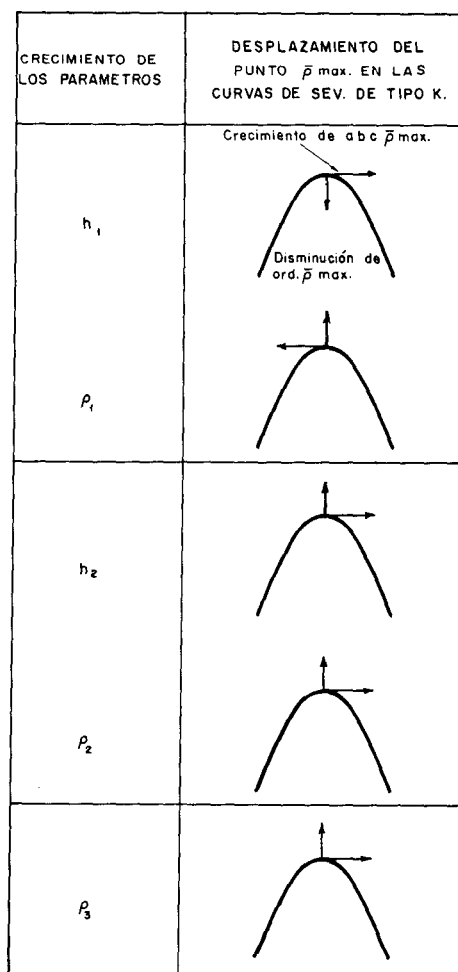


Fig. 188.— Características cualitativas del desplazamiento del punto $\bar{\rho}_{max}$, en las curvas de SEV de tipo K, en función de la variación de los parámetros de corte.

TABLA 37

VALORES MINIMOS DE h_2/h_1 , PARA LOS QUE LA ORDENADA DE $\bar{\rho}_{max}$ NO CRECE MAS DEL 10%

μ_1	Crecimiento de ρ_3/ρ_1	Valores de h_2/h_1
3/2	0-1	6
	1-1,2	1,5
4	0-1	5
	1-2	4
9	0-1	4
	1-3	9
19	0-1	2
	1-4	14
39	0-1	0,8
	1-6	8

En la tabla 37 se indica, para diferentes valores de ρ_2/ρ_1 , el mínimo de h_2/h_1 de modo que la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ no aumente en más del 10% de su valor inicial, al aumentar ρ_2/ρ_1 hasta límites determinados.

Hemos visto el grado de influencia de todos los parámetros del corte de tipo K en la posición del punto $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV. Para mayor comodidad, en la figura 188 se presenta un esquema general que define de modo cualitativo el desplazamiento característico del punto $\bar{\rho}_{max}$ en función del aumento de cada uno de los parámetros.

24.7. Proporción entre la ordenada del punto K y $\bar{\rho}_{max}$

En la tabla 38 se citan datos de la proporción existente entre la ordenada del punto K y $\bar{\rho}_{max}$ en las curvas de SEV de tipo K para diferentes valores de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 ($\rho_3/\rho_1=0$ y $\rho_3/\rho_1=1$). Es útil conocer estos datos para la interpretación de las curvas de SEV.

En la tabla 38 se ve que la ordenada del punto K es siempre mayor que $\bar{\rho}_{max}$.

TABLA 38

RELACION ENTRE LA ORDENADA DEL PUNTO K Y LA ORDENADA DE $\bar{\rho}_{max}$ EN LAS CURVAS DE SEV DE TIPO K PARA DIFERENTES PARAMETROS DEL CORTE

μ_1	ρ_3/ρ_1	Valores de ν_1						
		0,5	1	2	3	5	9	24
3/2	0	—	—	1,2	1,16	1,12	1,09	1,06
	1	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,03
4	0	1,45	1,47	1,39	1,35	1,33	1,25	1,12
	1	1,14	1,21	1,20	1,20	1,26	1,19	1,11
9	0	1,58	1,51	1,5	1,48	1,45	1,36	1,23
	1	1,28	1,35	1,32	1,34	1,31	1,25	1,19
19	0	1,60	1,57	1,53	1,52	1,55	1,47	1,27
	1	1,36	1,34	1,39	1,41	1,48	1,41	1,27
39	0	1,5	1,53	1,47	1,47	1,5	1,48	1,38
	1	1,4	1,44	1,47	1,48	1,5	1,44	1,33

25. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo K, cálculo del parámetro ρ_2

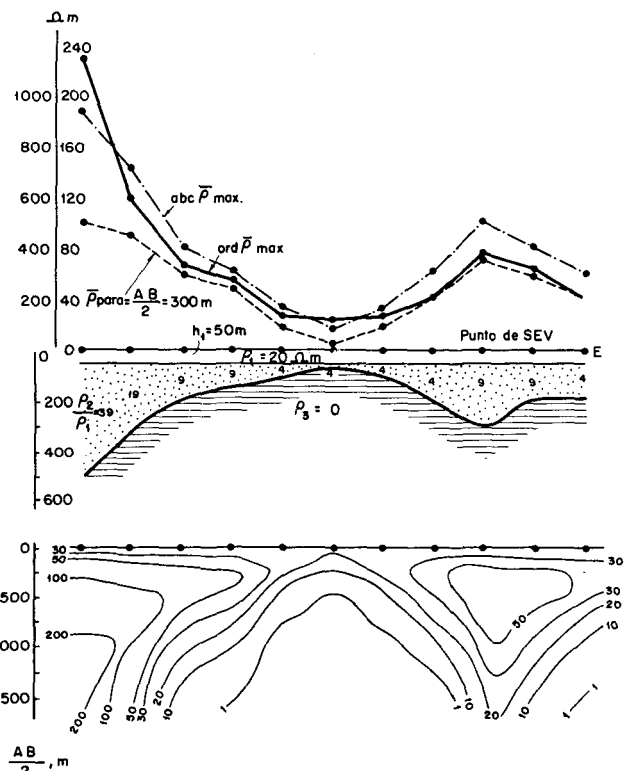
Para la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo K se hacen habitualmente planos de tipos de curvas, de valores h_1 y ρ_1 , planos y perfiles de abscisas y ordenadas de los puntos $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV, planos y cortes de resistividad aparente. Todos estos planos, perfiles y cortes se examinan conjuntamente, según las normas expuestas anteriormente.

Para la confección de planos de tipo de curvas se agrupan las mismas según la resistividad del horizonte de apoyo ($\rho_3=0$; $\rho_3 \neq 0$), el carácter del máximo de $\bar{\rho}$ (acentuado, perfilado, suave, impreciso), pendiente de la rama final, irregularidades y otras características propias de las curvas de SEV en la zona de exploración.

Los planos de igual resistividad aparente, para una o varias separaciones AB correspondientes a la rama descendente de las curvas de SEV, reflejan la variación de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo, para valores relativamente constantes de ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 . Se deduce claramente que las zonas con valores altos de la resistividad aparente indican el descenso del horizonte de apoyo conductor y las que presentan valores bajos, la subida del mismo.

Dado que la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ crece al aumentar h_1 y, especialmente h_2 , las áreas de valores altos de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$, para variaciones pequeñas de ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 , están relacionadas con el descenso del horizonte de apoyo y las áreas de valores bajos de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ con su elevación. El plano de abcisas de $\bar{\rho}_{max}$, siempre que se cumpla la relativa constancia de las resistividades, es un documento de interpretación cualitativa bastante elocuente, que refleja hasta cierto punto la marcha del horizonte de apoyo en el corte de tipo K.

Fig. 189.—Aspecto de los perfiles eléctricos y corte de resistividades aparentes originados por la subida del horizonte de apoyo conductor, según los resultados de los SEV.
1.—Isolíneas de resistividad en $\Omega \cdot m$.



Para poner de manifiesto más claramente la relación que existe entre la situación de la superficie del horizonte de apoyo conductor y la variación de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$, ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ y $\bar{\rho}$ para algunas semiseparaciones AB/2, en caso de diferentes ρ_2/ρ_1 , se muestra en la figura 189 la gráfica de todas estas magnitudes sobre un corte conocido de tipo K ($\rho_3=0$), en el que $h_1=50 \text{ m}$, $\rho_1=20 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ y ρ_2/ρ_1 variable entre 4 y 39. Como vemos, la subida del horizonte de apoyo conductor corresponde bien con los valores mínimos de las citadas magnitudes. El hundimiento del horizonte de apoyo va

ligado a la subida de estos valores, tanto más claramente cuanto mayor es ρ_2/ρ_1 . En la zona de subida del horizonte de apoyo la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ es mayor que el valor de $\bar{\rho}$ (para $AB/2 = 300$ m); en la zona de hundimiento la diferencia disminuye si ρ_2 varía poco de un punto de SEV a otro. Esta diferencia aumenta bastante si al crecer h_2 crece también ρ_2 , como se observa en la parte Oeste del mismo corte. El crecimiento simultáneo de estos dos parámetros pone de manifiesto también un fuerte crecimiento de la abscisa y ordenada de $\bar{\rho}_{max}$.

En la parte inferior de la figura 189 se muestra el corte de resistividades aparentes de las curvas de SEV para el caso considerado. Dicho corte refleja suficientemente bien la configuración de la superficie del horizonte de apoyo ($\rho_3 = 0$) y la variación de la resistividad de la segunda capa. Si en cualquiera de los puntos de SEV del terreno explorado se conocen los parámetros h_2 y ρ_2 de la capa intermedia del corte, entonces de modo análogo a lo indicado en el estudio de las curvas de SEV de tipo H, se puede, utilizando los gráficos de las figuras 175, 178, 184 y 185 y mediante aproximaciones sucesivas estudiar estos valores de h_2 y ρ_2 en otros puntos de SEV en la misma zona.

Cálculo del parámetro ρ_2

El valor de la resistividad ρ_2 de la capa intermedia en el corte de tipo K, necesario para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV, se calcula habitualmente, como en los restantes casos, mediante curvas paramétricas de SEV efectuadas en las proximidades de sondeos mecánicos en los que se han efectuado las investigaciones de testificación. A falta de estos datos de perforación y testificación se puede estimar, con menos exactitud, con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov. En el estudio de los cortes de tipo K a los que es aplicable el principio de equivalencia, es imposible calcular el parámetro ρ_2 de las curvas de SEV, si no se conoce h_2 en el correspondiente punto de SEV.

Veamos la obtención de ρ_2 mediante curvas paramétricas de SEV efectuadas en las proximidades de un sondeo mecánico. Si en el punto de SEV investigado los valores $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\nu_1 = h_2/h_1$ están dentro de los límites para los que existen ábacos calculados o contruidos gráficamente, el problema no presenta dificultades. Por la curva realizada junto al sondeo mecánico se calcula h_1 y ρ_1 (normalmente se menosprecia la posible anisotropía de esta primera capa). La diagraffía de la perforación permite calcular el espesor h_2 de la capa de resistividad alta y, por consiguiente, $\nu_1 = h_2/h_1$. En la colección de ábacos de curvas de SEV calculadas o contruidas gráficamente se elige el correspondiente al valor hallado de ν_1 y con relación de ρ_2/ρ_1 más próxima a la observada por la testificación y la curva de SEV. Superponiendo el impreso de la curva de SEV dada sobre el ábaco citado, se halla de entre las curvas de SEV calculadas (directamente o por interpolación) la que coincida mejor con la curva experimental.

Esta curva nos da la incógnita μ_1 , por lo que conociendo ρ_1 fácilmente se calcula ρ_2 .

Si no se encuentra en la colección el ábaco correspondiente al valor hallado de ν_1 , entonces calcularemos μ_1 por su valor más próximo ν'_2 y a continuación se calcula por el principio de equivalencia, con la condición de que el corte esté dentro de los límites de aplicación de este principio.

Si no es posible la sustitución del valor observado de ν_1 por otro ν'_1 del ábaco por no ser de aplicación el principio de equivalencia, se recurre a la construcción gráfica del ábaco correspondiente al valor dado de ν_1 . Sin embargo, en tales casos, se puede también hacer uso del ábaco K ν_1 .

Veamos un ejemplo práctico de cálculo del parámetro resistividad ρ_2 . En la figura 169 figura el corte geoelectrico correspondiente a un sondeo mecánico y la curva de SEV realizada cerca del mismo. Hallaremos ρ_2 apoyándonos en estas indicaciones de la diagrafía del sondeo mecánico y en la gráfica de SEV. Por esta última, con auxilio del ábaco de dos capas, calculamos $h_1 = 300$ m, $\rho_1 = 10$ ohm.m. Estos datos coinciden por completo con los resultados de la testificación. La resistividad de la segunda capa, según la testificación, es grande, aunque las rocas que la componen no son de naturaleza aislante, ya que la curva de SEV, para semiseparación $AB/2$ grande, acusa una capa conductora debajo de la roca de resistividad alta. Según la diagrafía del sondeo mecánico, la resistividad de estas rocas es de más de 500 ohm.m.

Partiendo de la diagrafía hallamos que la profundidad H de la superficie del horizonte de apoyo es 600 m. Por tanto, el espesor de la capa de resistividad alta es de 300 m. De aquí que en el punto de SEV se tiene $\nu_1 = h_2/h_1 = 1$. Para calcular $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, utilizamos el ábaco auxiliar K ν_1 . Para ello fijaremos en primer lugar la posición del punto K de nuestra curva de SEV. Hacemos coincidir el punto h_1, ρ_1 de la curva con el origen de coordenadas del ábaco correspondiente a $\nu_1 = 1$, calcando a continuación en el impreso de dicha curva de SEV la curva de módulo $\nu_1 = 1$ del ábaco. El punto K se encuentra en alguna parte de esta curva. Para hallar su posición exacta hacemos uso, como sabemos, del ábaco de dos capas, trasladando el origen de coordenadas de este ábaco a lo largo de la curva así calcada (observando como siempre un paralelismo riguroso entre los ejes del ábaco y del impreso de SEV) hasta conseguir la coincidencia de la rama final de nuestra curva de SEV con una curva descendente del ábaco de dos capas. El origen de coordenadas del ábaco de dos capas da en esta posición el punto K de la citada curva $\nu_1 = 1$. Señalamos en el impreso de SEV la posición de este punto. Tan sólo queda hallar en el ábaco la curva de módulo μ_1 que pasa por el punto K. Para ello se superpone de nuevo el impreso de la curva de SEV sobre el ábaco K ν_1 , haciendo coincidir el punto h_1, ρ_1 con este mismo origen de coordenadas del ábaco. Fijamos directamente o por interpolación el valor μ_1 de la curva de la familia que pasa por

el punto hallado K. En nuestro caso μ_1 es aproximadamente igual a 130. Por consiguiente, $\rho_2 = \mu_1 \cdot \rho_1 \approx 1.300$ ohm.m.

Si en el corte de tipo K la segunda capa es anisótropa, entonces obtenemos un valor del parámetro ρ_2 que representa la resistividad media transversal de esta capa ($\rho_2 = \rho_{t2}$).

En cuanto al cálculo del parámetro ρ_2 con ayuda de los ábacos normales y de los nomogramas de A. I. Bogdanov no se diferencia en nada de lo expuesto en el estudio de las curvas de SEV de tipo H.

En resumen, en la interpretación cualitativa de las curvas de SEV es necesario definir con mayor o menor grado de aproximación el valor del parámetro ρ_2 en todos los puntos de SEV. En caso de no ser posible la valoración del mismo con ayuda de datos de sondeos mecánicos o medidas de afloramientos superficiales, se toma en cada punto de sondeo un valor condicional más probable de ρ_2 .

El interpretador necesita tener una idea suficientemente clara de la ley de variación de este parámetro en todo el terreno investigado. Sólo cumplida esta condición, como es el caso para cualquier corte eléctrico de tres capas, se puede iniciar la interpretación cuantitativa de los resultados de los SEV.

26. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo K

26.1. Interpretación con ayuda de los ábacos

La interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tres capas de tipo K con ayuda de los ábacos calculados u obtenidos gráficamente no presenta dificultad especial y se efectúan basándose en los mismos principios que en el caso de la interpretación de los restantes tipos de curvas ya considerados.

Sea por ejemplo un SEV (fig. 190) correspondiente a un punto dado en el que tenemos $\rho_2 = 450$ ohm.m y ν_1 variable entre 0,5 y 3. Con ayuda del ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 280$ m, $\rho_1 = 15$ ohm.m. Por tanto, $\mu_1 = 30$. En el corte eléctrico correspondiente al punto investigado, incluso para el valor máximo de ν_1 ($\nu_1 = 3$), es aplicable el principio de equivalencia, por lo que al aumentar μ_1 hasta 39 y disminuir ν_1 proporcionalmente, la curva de SEV dada no varía prácticamente de forma. Interpretando dicha curva con ayuda de los ábacos, para $\mu'_1 = 39$ y $\rho_3/\rho_1 = 0$ (ábaco 92), hallamos $\nu'_1 = 1,4$. Calcularemos este mismo valor para $\mu_1 = 30$, mediante la expresión del principio de equivalencia:

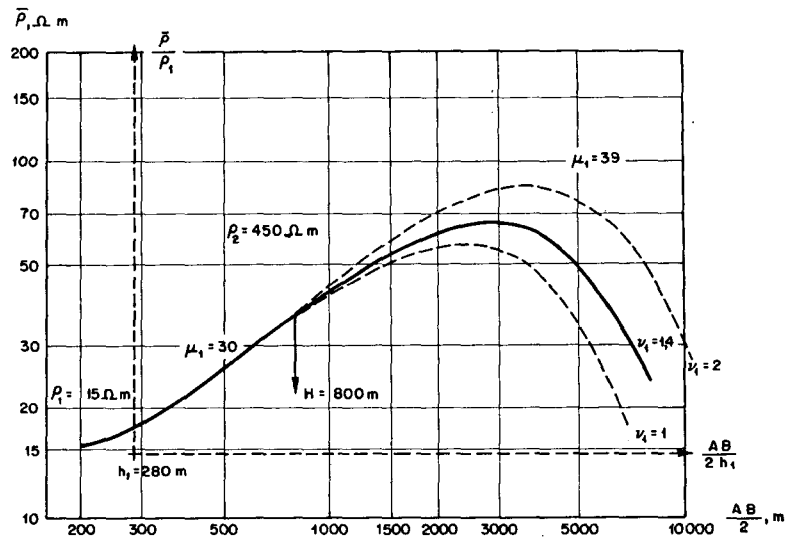
$$\mu'_1 \cdot \nu'_1 = \mu_1 \cdot \nu_1$$

de donde

$$\nu_1 = 39 \cdot 1,4 / 30 = 1,8$$

Por consiguiente, la incógnita resulta ser $h_2 = \nu_1 \cdot h_1 \approx 500$ m y $H = h_1 = h_2 \approx 800$ m.

Fig. 190.— Interpretación de una curva de SEV de tipo K con ayuda de los ábacos de tres capas.



Errores de interpretación surgidos a causa de inexactitud en el cálculo de ρ_3

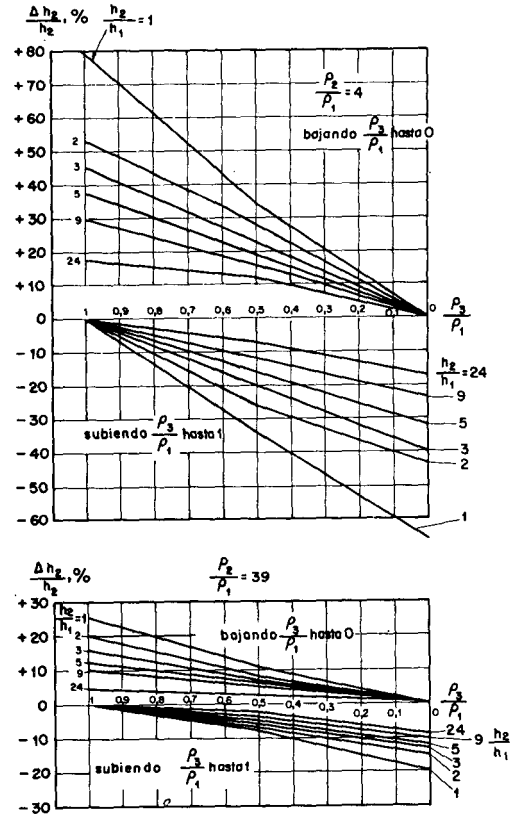
Los ábacos de curvas de SEV de tres capas del tipo que se estudia, lo mismo que en los restantes casos, están calculados para un número muy limitado de valores de ρ_3/ρ_1 . En la interpretación de las curvas prácticas de SEV se eligen con frecuencia valores de ρ_3 manifiestamente erróneos con objeto de poder utilizar los citados ábacos. Ello lleva consigo la introducción de errores en el cálculo del espesor de la segunda capa. Intentaremos fijar el orden de magnitud de tales errores en función de las relaciones dadas de los parámetros del corte h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 . Esto se hace fácilmente utilizando los ábacos calculados de curvas de SEV de tipo K para $\rho_3/\rho_1 = 1$ y $\rho_3/\rho_1 = 0$ e interpretando estos últimos para el cálculo de ρ_3 con error conocido de antemano.

No se ha realizado el examen sistemático del error de interpretación para valores verdaderos de $\rho_3/\rho_1 > 1$ por no existir número suficiente de curvas calculadas de SEV para este caso.

En la figura 191 se presentan los gráficos que caracterizan los errores de interpretación de interés para nosotros para dos valores $\mu_1 = 4$ y 39 y variación de ν_1 de 1 a 24 . Los errores en la valoración de h_2 tienen como vemos signo positivo al disminuir ρ_3 respecto a su valor verdadero y signo negativo en caso de aumento de ρ_3 . En magnitud absoluta estos errores decrecen al aumentar h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 .

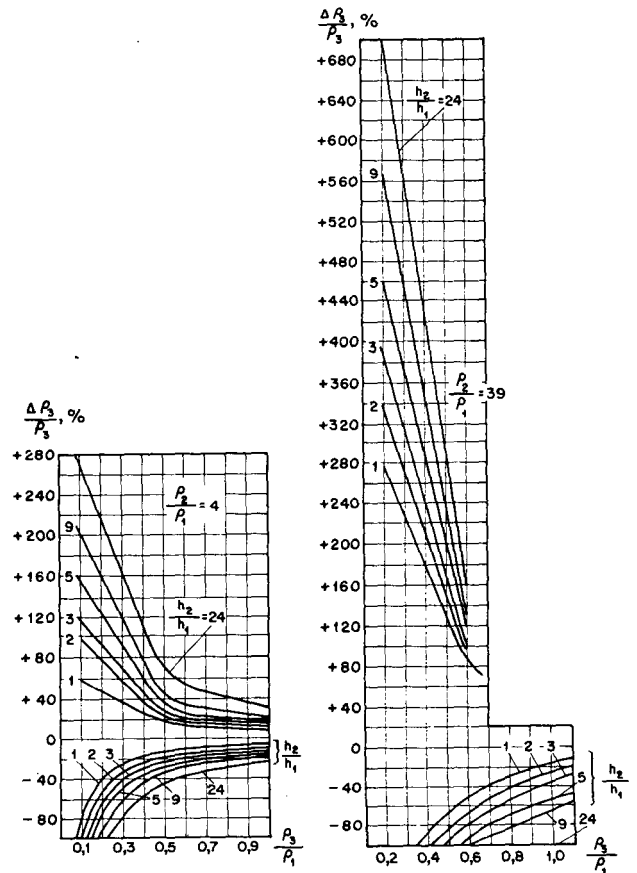
En la figura 192 se indican los máximos de los errores admisibles en la valoración de ρ_3 para los que los errores $\Delta h_2/h_2$ en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K, para $\mu_1 = 4$ y 39 y ρ_3/ρ_1 , variable de 0 a 1 , no superen $\pm 10\%$ del valor verdadero de h_2 . Como era de esperar, estos límites crecen fuertemente al aumentar ρ_2/ρ_1 .

Fig. 191.—
 Errores en el
 cálculo del
 espesor h_2 de la
 capa intermedia,
 en la
 interpretación
 de las curvas de
 tipo K, en el
 supuesto de que
 $\rho_3 = 0$
 ó $\rho_3 = 1$.



En los trabajos de interpretación práctica cuando la rama descendente de la curva de SEV no está bien definida a causa de una separación máxima de electrodos AB insuficiente, se

Fig. 192.—Límites de los errores admisibles en la valoración de ρ_3 (ρ_3/ρ_1 , de 0 a 1), para la interpretación de curvas de SEV de tipo K, con errores de hasta $\pm 10\%$ aproximadamente.



suele tomar frecuentemente $\rho_3=0$ en lugar de $\rho_3=\rho_1$ y recíprocamente se considera $\rho_3=\rho_1$ cuando en realidad $\rho_3\approx 0$.

En los gráficos de las figuras 191 y 192 se pueden ver los errores de interpretación motivados por esta causa. En la tabla 39 se dan los valores iniciales mínimos de h_2/h_1 (para diferentes ρ_2/ρ_1) para los que aún se puede admitir la citada inexactitud en la valoración de ρ_3 , sin provocar en el cálculo del espesor h_2 errores que excedan en $\pm 10\%$ de su valor verdadero.

Para facilitar la posibilidad de una estimación directa de los valores de ρ_3/ρ_1 para los que se pueda, con exactitud de $\pm 10\%$, interpretar las curvas de SEV de tipo K en el supuesto de $\rho_3/\rho_1=1$ ó 0 , se muestran en las figuras 193 y 194 los valores mínimos de ρ_3/ρ_1 que permiten la interpretación de las curvas de SEV en el supuesto de ρ_3/ρ_1 y los valores máximos de ρ_3/ρ_1 para los que se puede suponer $\rho_3=0$.

TABLA 39

VALORES MINIMOS DE h_2/h_1 PARA LOS QUE EL ERROR DE INTERPRETACION EN LA VALORACION DE h_2 NO ES SUPERIOR A $\pm 10\%$

$\mu_1 = \rho_2/\rho_1$	Valores de h_2/h_1	
	$\rho_3=0$ en lugar de $\rho_3=\rho_1$	$\rho_3=\rho_1$ en lugar de $\rho_3=0$
4	~40	~60
9	25	20
19	15	10
39	7	5

Si, por ejemplo, $\mu_1=9$ y $\nu_1=5$, entonces ρ_3/ρ_1 no puede ser menor de 0,8 (fig. 193) para que en la curva de SEV que se interpreta con ayuda de los ábacos, para $\rho_3=\rho_1$, se calcule con exactitud práctica h_2 . Si para estos mismos μ_1 y ν_1 se toma en la interpretación el ábaco correspondiente a $\rho_3=0$, entonces ρ_3/ρ_1 debe no ser mayor de 0,18 (fig. 194).

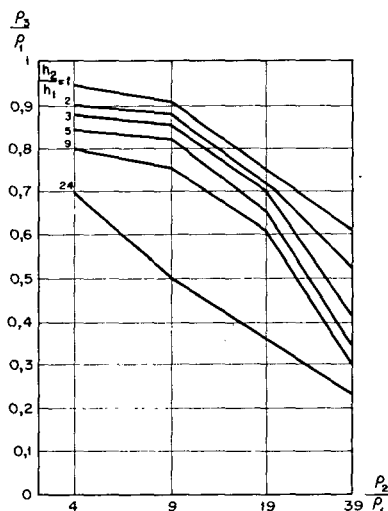
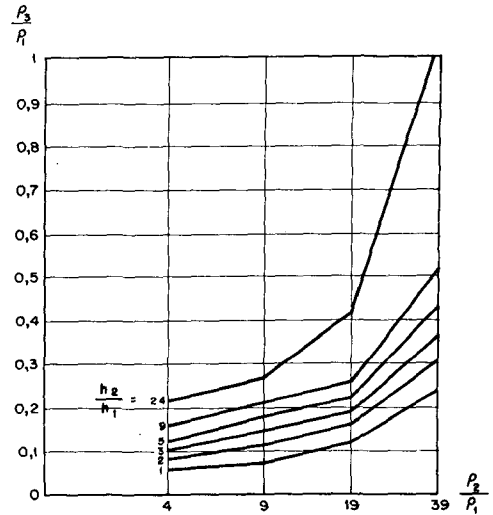


Fig. 193.—Valores mínimos de ρ_3/ρ_1 que permiten la interpretación de curvas de SEV de tipo K, en el supuesto de que $\rho_3=\rho_1$.

Fig. 194.—Valores máximos de ρ_3/ρ_1 que permiten la interpretación de curvas de SEV de tipo K, en el supuesto de que $\rho_3=0$.



Errores de interpretación en función de los errores en la valoración de h_2 y ρ_1

En la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo K con ayuda de los ábacos de tres capas es siempre posible cometer errores en el cálculo de los parámetros h_1 y ρ_1 . Como se puede ver fácilmente, los errores en la valoración de h_1 y ρ_1 serán generalmente del mismo signo.

El análisis de los resultados de la interpretación de las curvas calculadas de SEV indica que si el parámetro ρ_2 está calculado con suficiente exactitud, entonces los errores en la valoración de h_1 y ρ_1 no producen grandes errores en el cálculo de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo. Este último error tiene siempre el mismo signo que los errores cometidos en la valoración de h_1 y ρ_1 .

Hallemos la expresión general del error de interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo K para $\rho_3=0$, provocado por la inexactitud en el cálculo de h_1 y ρ_1 , de modo análogo a como se hizo en las curvas de SEV de tipo H para $\rho_3=\infty$. Para ello partiremos de la misma magnitud T de los cortes expresada en las curvas de SEV que se interpretan y de los ábacos.

Designemos por $m\%$ el error en el cálculo de h_1 y por $n\%$ el de ρ_1 y los coeficientes de estos errores por $K_1=1+m/100$ y $K_2=1+n/100$, respectivamente. El valor verdadero T es igual en el corte estudiado a $h_1 \cdot \rho_1 + h_2 \cdot \rho_2$.

Haciendo coincidir con la curva de SEV que se interpreta una curva del ábaco, de modo que se tengan los errores indicados en la valoración de h_1 y ρ_1 , se produce evidentemente un error en el cálculo de h_2 (se supone ρ_2 calculado con exactitud suficiente). En este caso

$$T' = K_1 \cdot h_1 \cdot K_2 \cdot \rho_1 + h'_2 \cdot \rho_2$$

siendo h'_2 el valor erróneo obtenido del espesor de la segunda capa. Suponiendo $T'=T$, hallamos,

$$h'_2 = \frac{h_1 \cdot \rho_1}{\rho_2} + h_2 - \frac{K_1 \cdot h_1 \cdot K_2 \cdot \rho_1}{\rho_2}$$

El error absoluto en la valoración de h_2 se expresa por:

$$\Delta h_2 = h'_2 - h_2 = \frac{h_1 \cdot \rho_1}{\rho_2} (1 - K_1 \cdot K_2) \quad (46)$$

y el error absoluto en la valoración de H , profundidad del horizonte de apoyo por

$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2 = h_1 (K_1 - 1) + \frac{h_1 \cdot \rho_1}{\rho_2} (1 - K_1 \cdot K_2) \quad (47)$$

De aquí es fácil hallar los errores relativos en el cálculo de h_2 y H :

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} \cdot 100 = \frac{h_1 \cdot \rho_1}{h_2 \cdot \rho_2} (m + n + 0,01 m \cdot n) \% \quad (48)$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{m - \frac{\rho_1}{\rho_2} (m + n + 0,01 m \cdot n)}{1 + \frac{h_2}{h_1}} \% \quad (49)$$

La expresión (48) indica que si m y n tienen signo positivo, entonces el error en el cálculo de h_2 conduce a la disminución del espesor de esta capa y, a la inversa, los errores en la valoración de h_1 y ρ_1 de signo negativo lleva consigo un aumento del espesor de la segunda capa.

Si en las fórmulas (48) y (49) ponemos $n=0$ ó $m=0$, entonces obtenemos la expresión del error de interpretación en función del error en el cálculo de uno solo de los parámetros.

Errores de interpretación en función de los errores en la valoración de ρ_2

La exactitud en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K dependen principalmente, como en las restantes curvas de tres capas, de la exactitud en el cálculo del parámetro ρ_2 , resistividad de la segunda capa. Hallemos la expresión del error de interpretación producido por el supuesto error en la valoración de este parámetro.

Sea el error de cálculo de ρ_2 en el punto de SEV para la curva que se interpreta igual a $p\%$ con un determinado signo y el coeficiente de error $K_3 = 1 + p/100$.

El valor verdadero de la resistencia transversal total del corte, en el punto de SEV es igual a

$$T = h_1 \cdot \rho_1 + h_2 \cdot \rho_2$$

Igualando la curva de SEV que se interpreta con la curva del ábaco, en caso de corte equivalente, tendremos el mismo valor de T :

$$T = h_1 \cdot \rho_1 + h'_2 \cdot K_3 \cdot \rho_2$$

siendo h'_2 el valor erróneo de h_2 causado por el error en el cálculo de ρ_2 .

De las ecuaciones indicadas se deduce:

$$h'_2 = \frac{T - h_1 \cdot \rho_1}{K_3 \cdot \rho_2} = \frac{h_2}{K_3}$$

de donde

$$\Delta h_2 = \frac{h_2(1 - K_3)}{K_3} \quad (50)$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} \cdot 100 = - \frac{p}{K_3} \% \quad (51)$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = - \frac{(h_2/h_1) \cdot (p/K_3)}{1 + h_2/h_1} \quad (52)$$

Las ecuaciones (51) y (52) señalan que los errores en la valoración de h_2 y H tienen signo opuesto al error en el cálculo de ρ_2 .

Si por ejemplo para los valores verdaderos $h_2 = 600$ m y $\rho_2 = 500$ ohm.m cometemos un error en la valoración de ρ_2 del 50% ($K_3 = 1,5$) y tomamos en la interpretación de la curva de SEV $\rho_2 = 750$ ohm.m, entonces el error en el cálculo de h_2 será:

$$\Delta h_2 = - 600 \cdot 0,5 / 1,5 = - 200 \text{ m}$$

$$(\Delta h_2/h_2) \cdot 100 = \frac{- 50}{1,5} = - 33\%$$

Errores provocados por la interpretación de las curvas de SEV con ayuda del ábaco de dos capas

La interpretación aproximada de las curvas de SEV del tipo indicado mediante la utilización del ábaco de dos capas (fig. 195) es admisible tan sólo en caso de ρ_2/ρ_1 pequeño, para h_2/h_1 muy pequeño o muy grande.

Mediante el análisis de las curvas de SEV calculadas se han construido los gráficos del error de interpretación representados en la figura 196.

El examen de los mismos permite indicar los límites de h_2/h_1 siguientes que hacen posible la interpretación de las curvas de SEV de tipo K ($\rho_3 = 0$) con auxilio del ábaco de dos capas, con un error que no sobrepasa de + 10% (tabla 40).

Fig. 195.— Interpretación de curvas de SEV de tipo K para grandes espesores de h_2 con ayuda del ábaco de dos capas. Valores verdaderos: $\rho_2 = 23 \Omega \text{ m}$; $H = 375 \text{ m}$.

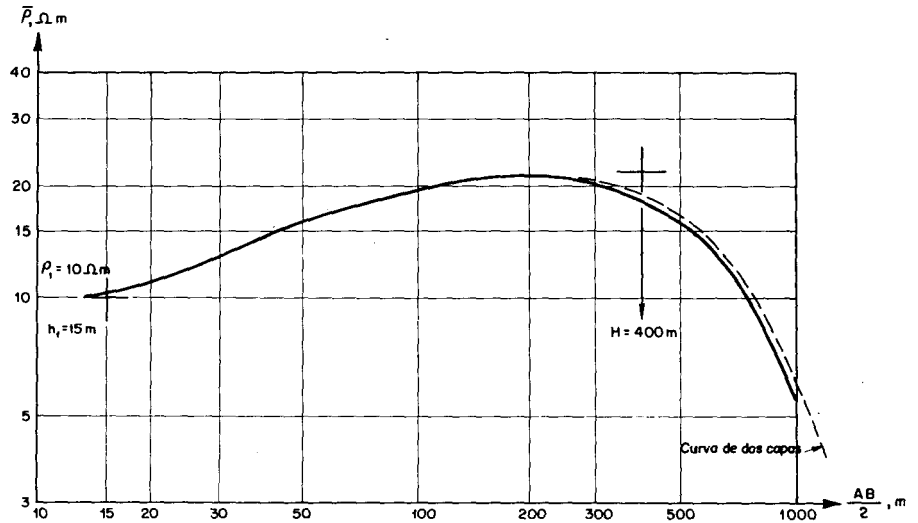


Fig. 196.— Errores en el cálculo de la profundidad del horizonte eléctrico de apoyo en las curvas de SEV de tipo K, con ayuda del ábaco de dos capas.

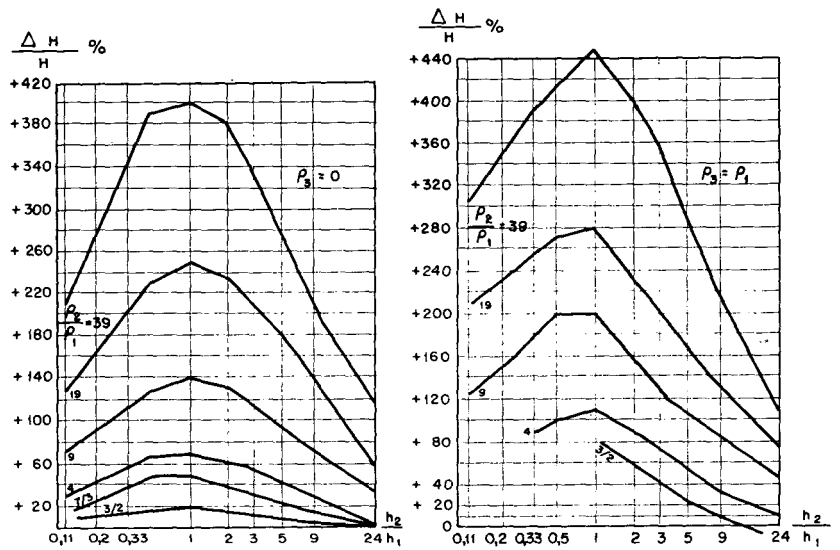


TABLA 40

VALORES EXTREMOS DE h_2/h_1 PARA LOS QUE ES POSIBLE LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV DE TIPO K ($\rho_3 = 0$) CON AYUDA DEL ABACO DE DOS CAPAS

μ_1	Valores de h_2/h_1	
3/2	< 0,3	> 3
7/3	< 0,09	> 13
4	< 0,08	> 20

Error en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K con apariencia de curvas de dos capas

Como ya hemos indicado, las curvas de SEV de tipo K que reflejan un corte de tres capas en el que la segunda capa tiene un espesor h_2 pequeño en comparación con el espesor h_1 de la primera capa o en el que la resistividad ρ_2 de esta

segunda capa tiene un valor próximo a ρ_1 , no se diferencian por su aspecto de las curvas de SEV de dos capas en las que $\rho_2 > \rho_1$.

La interpretación de las curvas de SEV de tipo K que tienen la capa intermedia poco definida como curvas de dos capas, supone un error en el cálculo de la profundidad H de la superficie del horizonte de apoyo conductor.

Igualando el valor de la resistencia transversal total del corte con la magnitud T calculada al interpretar la curva de SEV como si fuera de dos capas, hallamos fácilmente la expresión del error de interpretación.

$$\Delta H = h'_1 - h_2 = h_2(\rho_2/\rho_1 - 1) \quad (53)$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{h_2/h_1(\rho_2/\rho_1 - 1) \cdot 100}{1 + h_2/h_1} \quad (54)$$

Como vemos, el error depende de h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 , aumentando al hacerlo estas magnitudes. Este error tiene siempre signo positivo.

Por tanto, al despreciar la capa intermedia poco definida, en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K, siempre se produce una exageración en el valor de la profundidad del horizonte de apoyo.

En la figura 197 se muestra un gráfico del error calculado mediante la fórmula (54). El mismo evidencia la posibilidad de cometer errores muy grandes al interpretar las curvas de SEV de este modo, en especial para valores relativos de los parámetros de la capa intermedia ρ_2/ρ_1 y h_2/h_1 grandes.

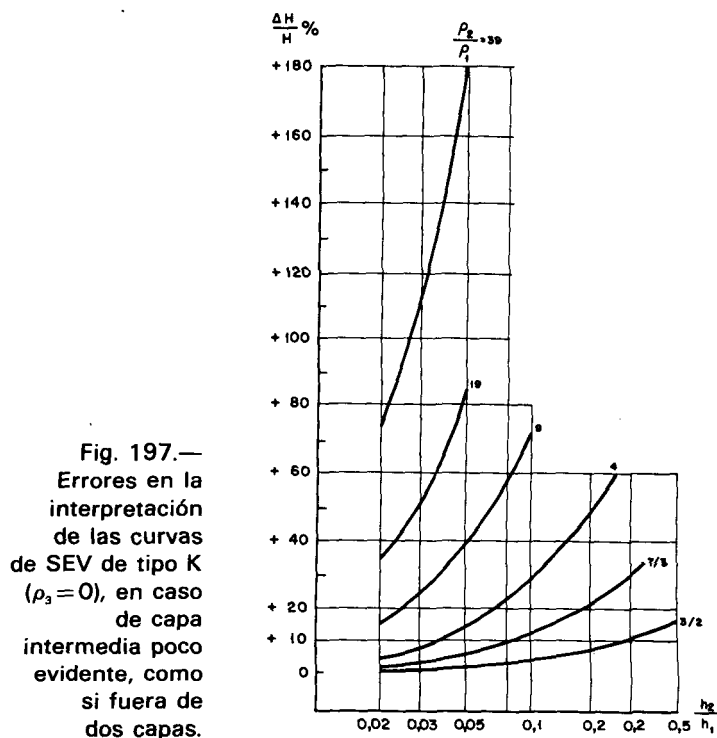


Fig. 197.— Errores en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K ($\rho_3 = 0$), en caso de capa intermedia poco evidente, como si fuera de dos capas.

26.2. Interpretación con ayuda del ábaco auxiliar K y del ábaco de dos capas

Además del método de comparación directa de las curvas de SEV de tipo K con las curvas calculadas de tres capas, se utiliza con frecuencia en la interpretación de este tipo el método de utilización conjunta del ábaco auxiliar K y del ábaco de curvas de SEV de dos capas. Este método de interpretación puede considerarse como un proceso inverso al de la construcción gráfica de las curvas de SEV de tipo K.

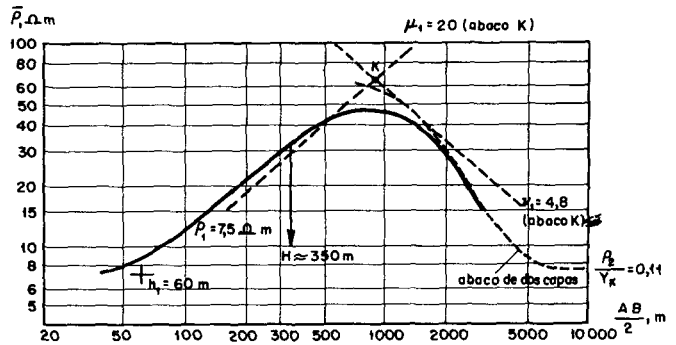
Como es habitual se calculan h_1 y ρ_1 . Conociendo ρ_2 se calcula $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. A continuación se superpone la curva de SEV sobre el ábaco K de modo que el punto h_1, ρ_1 coincida con el origen de coordenadas del ábaco correspondiente al valor hallado μ_1 y se calca en el impreso de esta curva μ_1 del ábaco. La posición del punto K se fija con ayuda del ábaco de dos capas, cuyo origen de coordenadas se traslada por la curva μ_1 (observando rigurosamente el paralelismo de los ejes de coordenadas del ábaco e impreso) hasta que la rama descendente de alguna de las curvas de dos capas coincida de modo óptimo con la rama final de la gráfica de SEV que se interpreta. En este momento, el origen de coordenadas del ábaco marcará sobre la curva μ_1 el punto K. Señalada su posición en el impreso de SEV queda tan sólo hallar en el ábaco K la curva que pasa por este punto. Para ello superponemos de nuevo el impreso de la curva de SEV sobre el ábaco K haciendo coincidir como antes el punto h_1, ρ_1 con el citado origen de coordenadas (μ_1) del ábaco. Se toma directamente del ábaco o interpolando el valor ν_1 de la curva de esta segunda familia que pasa por el punto hallado. Esto soluciona el problema, ya que $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$.

Veamos este método de interpretación con un ejemplo práctico. Sea éste hacer la interpretación cuantitativa de la curva de SEV de tipo K de la figura 198. Supongamos que en la zona investigada $\rho_2 = 150$ ohm.m. Mediante el ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 60$ m, $\rho_1 = 7,5$ ohm.m y de aquí $\mu_1 \approx 20$. El punto h_1, ρ_1 del impreso con la curva de SEV se superpone al origen del ábaco K correspondiente al valor $\mu_1 = 20$ observado, calcándose sobre aquél dicha curva $\mu_1 = 20$ mediante interpolación entre las curvas $\mu_1 = 19$ y $\mu_1 = 24$. A continuación, con ayuda del ábaco de dos capas, calculamos la posición del punto K. Superponiendo de nuevo el impreso con la curva de SEV que se interpreta sobre el ábaco K del mismo modo que la primera vez, hallamos que por el punto K obtenido pasa la curva $\nu_1 = 4,8$ del ábaco. De aquí, $h_2 = \nu_1 \cdot h_1 \approx 290$ m y $H = h_1 + h_2 = 350$ m.

El análisis de los resultados de la interpretación por este método de las curvas calculadas de SEV demuestra que en caso de $\rho_3/\rho_1 \leq 1$ y $h_2/h_1, \rho_2/\rho_1$ cualesquiera, el error en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo, supuesta una valoración exacta de todos los parámetros del corte, no excede de 10-15%. El espesor del recubrimiento suele ser por exceso.

El aumento de ρ_3/ρ_1 lleva consigo un aumento en el error de interpretación. Los límites de aplicación del método se reducen en general al disminuir h_2/h_1 . En caso de valores relativamente grandes de ρ_3/ρ_1 se puede utilizar tan sólo para $h_2/h_1 \geq 9$.

Fig. 198.—
Ejemplo de
interpretación
de curva de tres
capas de SEV
de tipo K con
ayuda del ábaco
auxiliar K y
del ábaco de
dos capas.



26.3. Interpretación con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov

La aplicación de los nomogramas de A. I. Bogdanov en la interpretación de las curvas de SEV de tipo K no se diferencia en nada de la metodología de su utilización en los restantes tipos de curvas. Recordemos que con ayuda de estos nomogramas se pueden calcular separadamente los parámetros h_2 y ρ_2 en el punto dado de SEV siempre que en el corte no sea de aplicación el principio de equivalencia. La exactitud en el cálculo de los parámetros es de ± 15 a 20%.

26.4. Interpretación por el método de comparación con curvas prácticas de SEV

En la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo K se utiliza a veces el método de la comparación de los mismos con otras curvas de SEV obtenidas en el terreno que se investiga, para las que se conoce la profundidad del horizonte de apoyo.

Como ya se puso de manifiesto en el estudio de las curvas de SEV de otros tipos, este método puede ser causa de grandes errores.

El análisis de los resultados de la interpretación de curvas calculadas de SEV de tipo K por el método de comparación, demuestra que dicha método tan sólo puede utilizarse para valores pequeños de ρ_2/ρ_1 ($\rho_2/\rho_1 \approx 3/2$) y $\rho_3/\rho_1 = 0$. Al aumentar ρ_2/ρ_1 , la posibilidad de una interpretación confiable de las curvas de SEV disminuye grandemente.

CURVAS DE SEV DE TIPO Q

Las curvas de SEV de este tipo caracterizan el corte eléctrico de tres capas en el que $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$. Las curvas de tipo Q son las de más difícil interpretación a causa de que la capa intermedia del corte, incluso para espesores grandes de la misma, no se manifiesta de un modo claro en la curva de SEV (fig. 199). El espesor de la segunda capa debe ser al menos cinco veces mayor que h_1 , para que la misma se manifieste de un modo evidente en la curva de SEV.

Las curvas de SEV de tipo Q han sido calculadas, análogamente, a los restantes tipos, para diez valores de

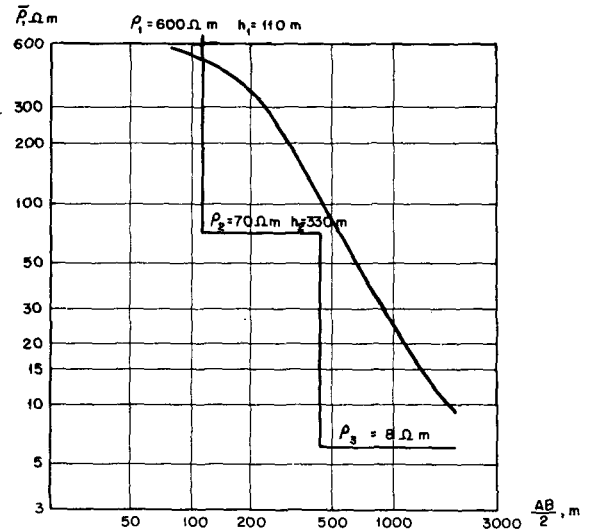


Fig. 199.—
Ejemplo de curva
de SEV de tipo Q
en la que no se
manifiesta la capa
intermedia.

h_2/h_1 , seis valores de ρ_2/ρ_1 (de $1/39$ a $2/3$) y tres valores de $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$: (0) , $(\rho_2/\rho_1)^2$, $(\rho_2/\rho_1)^{3/2}$.

Como se indica en la tabla-resumen (fig. 49) las curvas de SEV de tipo Q se reúnen, para ν_1 variable, en tres grupos de ábacos en función de μ_2 : 75-80, 63-68 y 439-444. Los valores variables de ρ_3/ρ_1 (dependientes de ρ_2/ρ_1) para los que existen curvas calculadas de SEV se indican en la citada tabla.

Con ayuda de los ábacos, por el método de construcción gráfica, se pueden obtener curvas de SEV de tipo Q para parámetros del corte cualesquiera.

27. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de tipo Q, cálculo del parámetro ρ_2

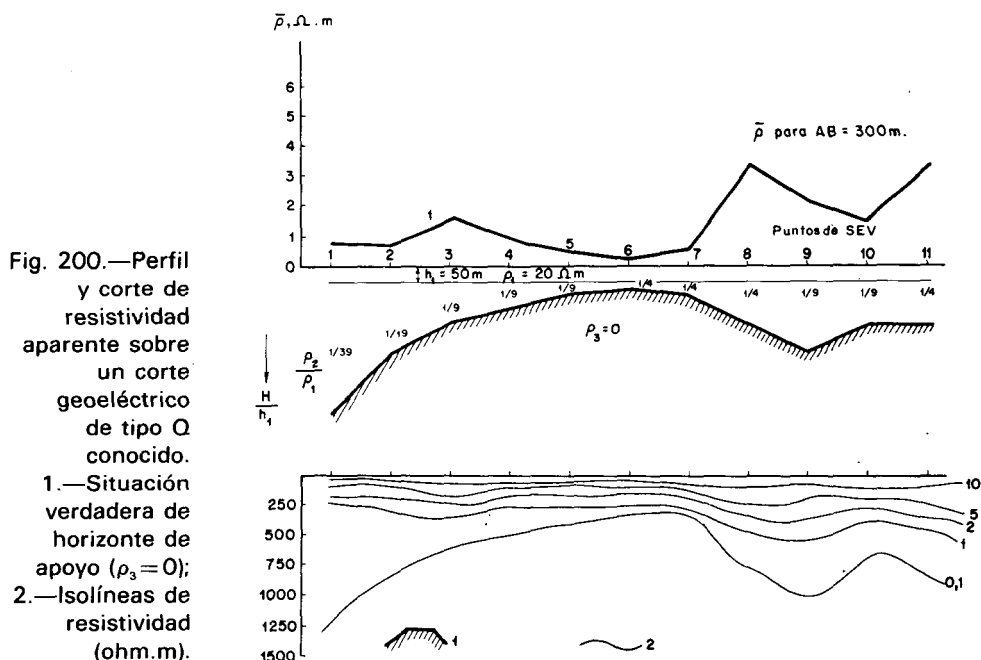
La interpretación cualitativa de las curvas de SEV de este tipo no se diferencia en nada de la correspondiente a los tipos restantes. Tan sólo hay que aclarar que en la investigación del corte de tipo Q las posibilidades del estudio cualitativo del material de SEV son menores a causa de la variación monótona de las curvas.

Se confeccionan planos de tipo de curvas de SEV, planos de igual valor de h_1 y ρ_1 , de igual valor de la resistividad aparente, cortes y perfiles de resistividad. Analizando los planos y las curvas de SEV se sacan conclusiones sobre la posición más probable del horizonte de apoyo conductor. Suele ser difícil o incluso imposible emitir un juicio sobre la variación de la resistividad ρ_2 mediante la investigación de este tipo de corte.

En los planos de tipo de curvas de SEV se pueden delimitar las áreas de presencia de curvas en que se señalan claramente y mal la capa intermedia, áreas con resistividad del horizonte de apoyo infinitamente pequeña o de valor finito, áreas de curvas alteradas, etc.

Se comprende fácilmente que si en el área de exploración son aproximadamente constantes los valores h_1 , ρ_1 y ρ_2 , entonces

en los planos y perfiles las zonas de resistividades bajas evidenciarán una aproximación a la superficie del terreno del horizonte de apoyo y, recíprocamente, las zonas de resistividades altas corresponderán a zonas de hundimiento.



En caso de h_1 , ρ_1 y sobre todo ρ_2 variables esta relación no se mantiene. En la figura 200 se presenta, a modo de ejemplo, un corte eléctrico de tipo Q en el que son constantes $h_1 = 50$ m y $\rho_1 = 20$ ohm.m y ρ_2 variable (para $\rho_3 = 0$). La profundidad del horizonte de apoyo oscila entre $0,5 h_1$ y $9 h_1$. El perfil de resistividad para $AB = 300$ m coincide en líneas generales con la posición de la superficie del horizonte de apoyo; sin embargo, se presentan anomalías en la curva $\bar{\rho}$ imputables a variaciones del parámetro ρ_2 . Así, por ejemplo, la variación de $\bar{\rho}$ desde el punto de SEV 3 al punto de SEV 1, está provocada por una disminución fuerte de ρ_2 junto con el hundimiento del horizonte de apoyo.

El corte de resistividad aparente citado en la figura 200 indica claramente la posición de la superficie del horizonte de apoyo por la isolínea 0,1 ohm.m.

Cálculo del parámetro ρ_2

Como en todos los casos de corte eléctrico estudiados, para la valoración de ρ_2 , en la investigación del corte de tipo Q, se recurre ante todo a los datos de perforación y testificación de sondeos mecánicos realizados en la zona de estudio. El valor de ρ_2 , que se puede considerar la base de la interpretación se calcula mediante curvas paramétricas de SEV ejecutadas en las proximidades de estos sondeos mecánicos.

Las diagrfías, junto con el corte geológico de la perforación, permiten hallar el espesor h_2 de la segunda capa y la

profundidad H del horizonte de apoyo (fig. 201). Por la curva de SEV se calculan los valores h_1 y ρ_1 , lo que nos da $h_2 = H - h_1$. Este último valor sirve de control del obtenido por la perforación. En caso de divergencia entre estos dos valores se toma el h_2 deducido del h_1 obtenido en la interpretación de la curva de SEV. En ella se desprecia la posibilidad de anisotropía de la primera capa.

Conocidos $\nu_1 = h_2/h_1$ y $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ (μ_2 se calcula, aunque sea aproximadamente, por la posición de la rama final de la curva de SEV y por los datos de la testificación) localizamos el ábaco de curvas calculadas de SEV o construidas gráficamente, correspondiente a estos valores de ν_1 y μ_2 . Se superpone el impreso con la curva de SEV sobre el ábaco y se obtiene el valor de la incógnita $\rho_2 = \mu_1 \cdot \rho_1$.

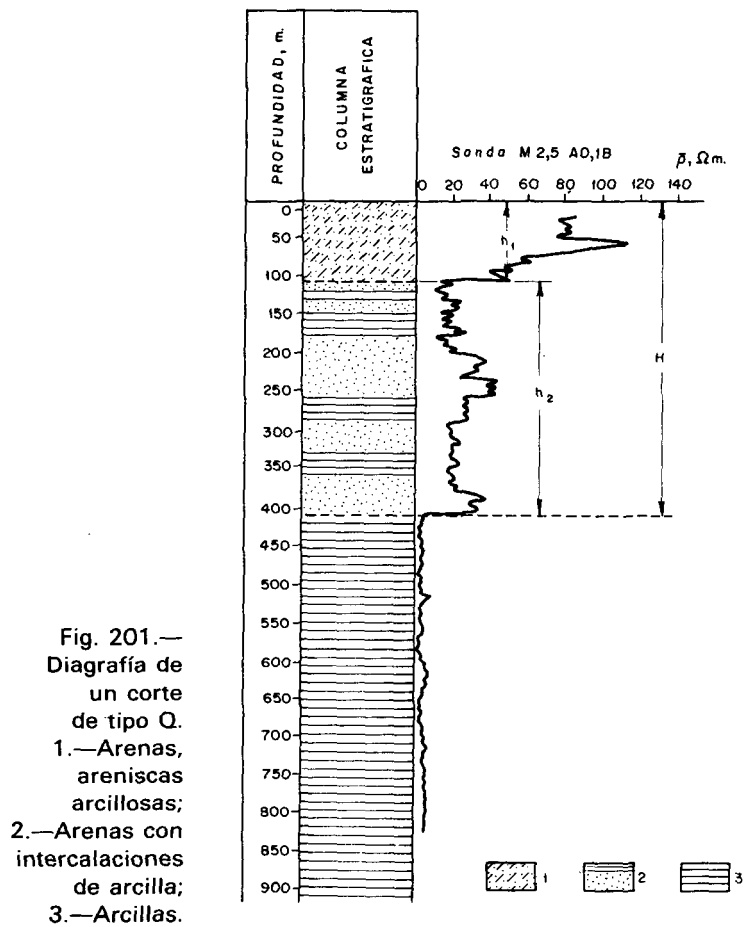


Fig. 201.—
Diagrama de
un corte
de tipo Q.
1.—Arenas,
areniscas
arcillosas;
2.—Arenas con
intercalaciones
de arcilla;
3.—Arcillas.

Si en el punto de SEV dado es aplicable el principio de equivalencia (en T), lo que se puede aclarar con ayuda del nomograma (fig. 74), entonces en caso de no existir el ábaco correspondiente al valor hallado de ν_1 se utiliza un ábaco de valor contiguo ν'_1 , al dado. En este ábaco se obtiene μ'_1 y a continuación por la fórmula del principio de equivalencia se deduce la incógnita μ_1 . Sin embargo, teniendo en cuenta que para el corte de tipo Q el principio de equivalencia tan sólo tiene aplicación de forma aproximada, se recomienda obtener los ábacos no existentes mediante el método gráfico y valerse de ellos para la interpretación.

También se puede calcular ρ_2 con ayuda del ábaco auxiliar Q. Sea, por ejemplo, junto al sondeo mecánico cuya diagraffía se representa en la figura 201, una curva de SEV paramétrica representada en la figura 202. Con ayuda del ábaco de dos capas hallamos $h_1 = 50$ m, $\rho_1 = 100$ ohm.m. Por los datos obtenidos en la perforación se tiene $h_1 \approx 100$ m, $H = 400$ m. Como vemos, según estos resultados del SEV, la mitad inferior de la primera capa queda incluida en el segundo horizonte eléctrico. De aquí se deduce que el espesor h_2 vendrá dado por $h_2 = H - h_1 = 350$ m. A continuación calculamos $\nu_1 = h_2/h_1 = 7$. No existe ábaco calculado correspondiente a este valor de ν_1 . Tampoco es posible tomar un ábaco de módulo ν_1 contiguo ($\nu_1 = 5$ ó 9), ya que en este corte (según la diagraffía se puede tomar μ_1 igual aproximadamente a $1/3 - 1/4$) no es aplicable el principio de equivalencia.

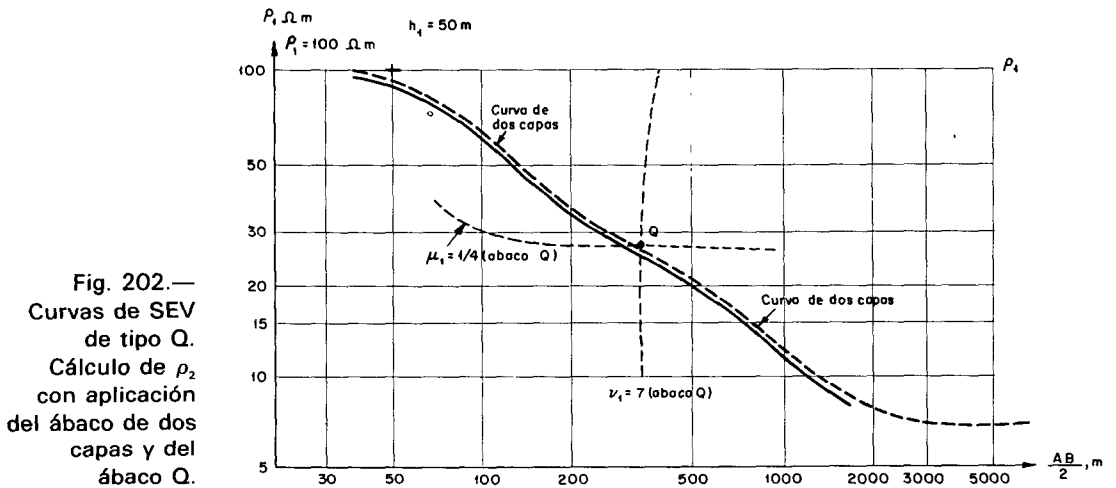


Fig. 202.—
Curvas de SEV
de tipo Q.
Cálculo de ρ_2
con aplicación
del ábaco de dos
capas y del
ábaco Q.

A continuación utilizamos el ábaco Q. Hacemos coincidir su origen de coordenadas con el punto h_1, ρ_1 de la curva de SEV, transfiriendo al impreso de ésta la línea $\nu_1 = 7$ del ábaco. En esta línea se encuentra el punto Q. Para hallar su posición exacta, volvemos de nuevo a utilizar el ábaco de dos capas. Trasladamos sobre éste el impreso con la curva de SEV dada de modo que el origen de las coordenadas del ábaco deslice sobre la línea ν_1 y los ejes del impreso y del ábaco queden constantemente paralelos entre sí, hasta una posición de la curva de SEV tal que su rama izquierda descendente coincida de modo óptimo con una curva de tipo descendente del ábaco de dos capas. En este momento, la rama final asintótica de esta última da un valor ρ_2 próximo al observado. En esta posición de la curva que se interpreta, el origen de coordenadas del ábaco de dos capas, situado en la línea ν_1 , define la posición del punto Q. Señalada esta posición en el impreso de SEV queda tan sólo fijar la línea μ_1 del ábaco Q que pasa por ese punto.

Para ello superponemos de nuevo el impreso con nuestra curva de SEV sobre el ábaco Q de modo que el punto h_1, ρ_1 coincida con el origen de coordenadas del ábaco (conservando

como siempre el paralelismo entre los ejes) hallando que por el punto Q señalado pasa la curva del ábaco de módulo $\mu_1 = 1/4$. De aquí se deduce el valor de la incógnita $\rho_2 = \mu_1 \cdot \rho_1 = 25$ ohm.m.

El análisis correspondiente indica que este método de valoración con ayuda del ábaco Q da un valor de ρ_2 con una exactitud del orden de ± 10 a 15%.

El parámetro ρ_2 se puede calcular también en las curvas de SEV de tipo Q con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov, siempre que en el corte no sea de aplicación el principio de equivalencia. Veamos un ejemplo de este cálculo.

Supongamos que en un terreno de exploración en el que no se tienen datos de sondeos mecánicos hay que calcular ρ_2 para un punto de SEV cuya curva se presenta en la figura 203. Con ayuda del ábaco de dos capas hallamos $h_1 = 150$ m, $\rho_1 = 100$ ohm.m. De la curva de SEV obtenemos los valores de $\bar{\rho}/\rho_1$ para $AB/2h_1 = 4, 8, 16$ y 32 necesarios en la interpretación y calculamos sus logaritmos.

AB/2 (m)	$\bar{\rho}/\rho_1$	$\log \bar{\rho}/\rho_1$
600	0,18	1,26
1200	0,11	1,04
2400	0,068	2,83
4800	0,024	2,38

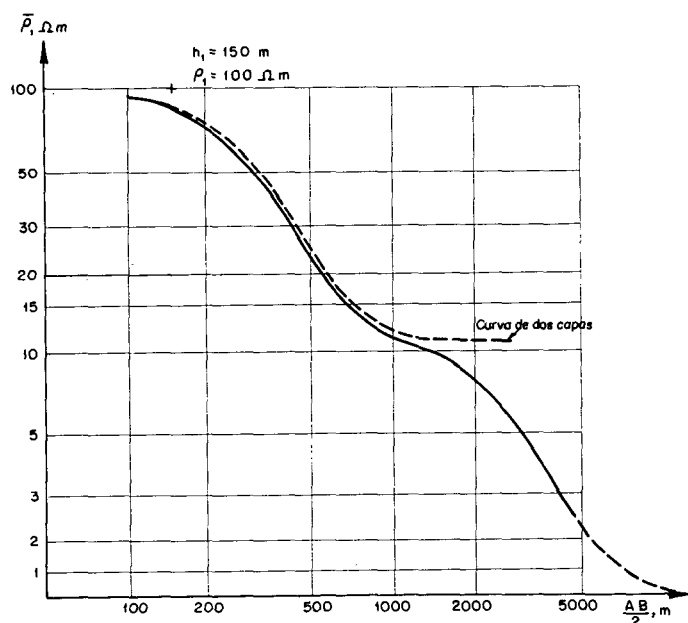


Fig. 203.— Ejemplo de cálculo de ρ_2 en curvas de SEV de tipo Q con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov.

A pesar de haberse alcanzado la semiseparación $AB/2 = 5000$ m la curva de SEV no evidencia en su rama derecha la resistividad ρ_3 del horizonte de apoyo. Prolongamos esta rama suponiendo que su posición asintótica es la correspondiente a, por ejemplo, $\rho_3 = 1,3$ ohm.m. En este caso, $\rho_3/\rho_1 = 0,013$ y $\log (\rho_3/\rho_1) = 2,14$. En la colección no existe un nomograma calculado para este valor de log

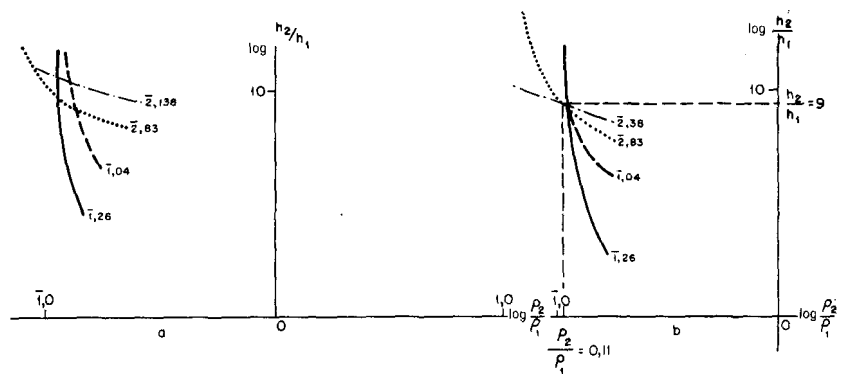
(ρ_3/ρ_1) . Utilizamos los nomogramas más próximos que son $\log(\rho_3/\rho_1) = 2,0$ y $\log(\rho_3/\rho_1) = 2,25$ (nomogramas 2 y 3).

Efectuando la construcción correspondiente con ayuda del primero de ellos, encontramos que las curvas no se cortan en un punto (fig. 204). Haciéndola con el nomograma 3 se produce una intersección satisfactoria de las mismas. Por consiguiente, para el corte dado se puede admitir la suposición de que $\log(\rho_3/\rho_1) = 2,25$. De donde $\rho_3/\rho_1 \approx 0,016$ y $\rho_3 = 1,6$ ohm.m.

Tomamos directamente del nomograma $\bar{\rho} = 0,11$, $h_2/h_1 \approx 9$; de donde $\rho_2 = \mu_1 \cdot 100 = 11$ ohm.m, y $h_2 = \nu_1 \cdot 150 = 1350$ m. El estudio de los nomogramas indica que el error en el cálculo de ambos parámetros por este método puede llegar a ± 15 a 20%.

Si comprobamos que el corte eléctrico cae dentro de los límites de aplicación del principio de equivalencia entonces, como sabemos, los nomogramas no permiten calcular los parámetros de la segunda capa. La inexistencia de sondeos mecánicos perforados hasta el horizonte de apoyo en este caso, excluye la posibilidad de realizar una interpretación cuantitativa auténtica del material de SEV.

Fig. 204.—Cálculo de ρ_2 (y h_2) en curvas de SEV de tipo Q con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov.
a.—Nomograma 2, $\log \rho_3/\rho_1 = 2,0$;
b.—Nomograma 3, $\log \rho_3/\rho_1 = 2,25$.



28. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo Q

Como en el caso de las curvas de SEV de tres capas de otros tipos las curvas de SEV de tipo Q pueden ser interpretadas por varios métodos: Mediante comparación con ábacos, con ayuda del ábaco Q y del ábaco de dos capas, mediante los nomogramas de A. I. Bogdanov.

28.1. Interpretación con ayuda de ábacos

Para la interpretación cuantitativa se utilizan los ábacos de curvas calculadas de SEV de tipo Q, así como de las obtenidas gráficamente. La construcción de los ábacos necesarios para cada caso concreto no presenta dificultad especial, recomendándose para la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q una utilización amplia de estos ábacos obtenidos gráficamente.

Con ayuda del ábaco de dos capas se calculan los valores h_1 y ρ_1 en la curva de SEV. Si en el SEV no se ha prolongado suficientemente la distribución AB para que se aprecie en la

curva el valor de ρ_3 , se estima aproximadamente, también con ayuda de este mismo ábaco. Conocido ρ_2 , se calcula $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. Se toma, para los valores μ_1 y $\mu_2 \approx \rho_3/\rho_1$, el ábaco de las curvas calculadas u obtenidas gráficamente, correspondiente al corte con $\nu_1 = h_2/h_1$, variable. Comparando, mediante superposición, la curva que se interpreta con las del ábaco, directamente o mediante interpolación se obtiene el valor ν_1 y, con ello, la incógnita $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$.

Errores de interpretación provocados por inexactitud en la valoración de ρ_3

Si se introduce en la interpretación de las curvas de SEV un valor erróneo del parámetro ρ_3 , se origina un error en el cálculo de h_2 . Por no existir número suficiente de curvas de SEV no es posible ver la relación general existente entre el error de ρ_3 y el error de interpretación. Nos limitamos, por tanto, al caso en que la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q se supone $\rho_3 = 0$, siendo en realidad la resistividad del horizonte de apoyo finita. En la figura 205 se tiene un gráfico del error producido al hacer esta suposición en función de los valores de h_2/h_1 y ρ_3/ρ_1 .

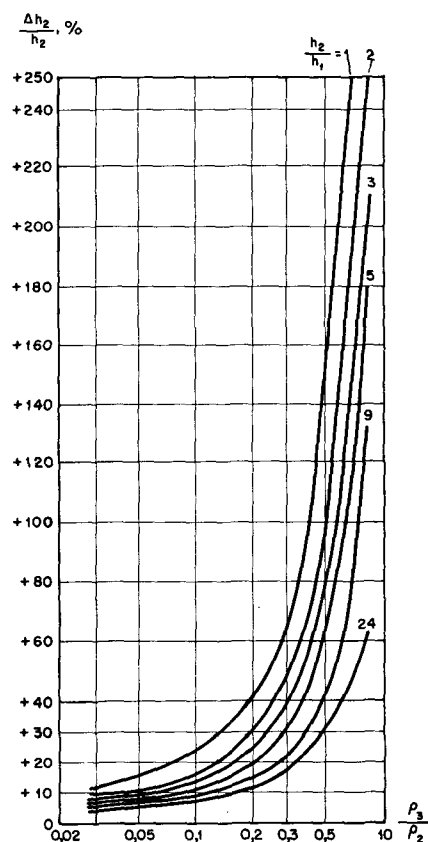


Fig. 205.—Errores en el cálculo del espesor de la capa h_2 , en la interpretación de curvas de SEV de tipo Q, al suponer $\rho_3 = 0$.

El error en el cálculo de h_2 aumenta al crecer ρ_3/ρ_2 y decrecer el valor inicial de h_2/h_1 . Al tomar $\rho_3 = 0$ siempre se exagera el valor del espesor h_2 y, por tanto, la profundidad del horizonte de apoyo.

En la tabla 41 se indican los límites máximos aproximados del valor de ρ_3/ρ_2 para los que se puede suponer $\rho_3 = 0$, en

función de h_2/h_1 . Como se ve, estos límites son pequeños, en especial para h_2/h_1 , relativamente pequeño.

Hemos examinado los casos extremos posibles de error en la valoración de ρ_3 . Si el error en el cálculo de ρ_3 no es demasiado grande (de un orden de magnitud del 10%) entonces el error en la interpretación tampoco será muy grande.

TABLA 41

VALORES MAXIMOS DE ρ_3/ρ_2 EN EL CORTE DE TIPO Q ($\rho_3 \neq 0$) PARA LOS QUE SE PUEDE SUPONER $\rho_3 = 0$ SIN QUE EL ERROR EN LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV SUPERE +10%

h_2/h_1	ρ_3/ρ_2	h_2/h_1	ρ_3/ρ_2
1	0,03	5	0,10
2	0,045	9	0,13
3	0,065	24	0,20

Errores de interpretación producidos por un error en la valoración de h_1 y ρ_1

Por el carácter de las curvas de SEV de tipo Q se comprende fácilmente que en la interpretación con ayuda de los ábacos de tres capas los errores en el cálculo de h_1 y ρ_1 tienen signo opuesto; al aumentar h_1 , disminuimos al mismo tiempo ρ_1 y recíprocamente al disminuir h_1 , aumentamos ρ_1 . Un error de signo positivo en la valoración de h_1 (y negativo en la valoración de ρ_1) en la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q, lleva consigo una disminución en la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo.

El límite de error máximo admisible en la valoración de h_1 con signo positivo (para $\rho_3/\rho_1 = 0$) es bastante grande; con signo negativo es comparativamente pequeño ($[\Delta h_1/h_1] \cdot 100$ de 40 a 20% y menos). El límite máximo admisible de error en el cálculo de ρ_1 es pequeño en ambos casos.

Errores de interpretación por error en la valoración de ρ_2

Un error en el cálculo de ρ_2 implica habitualmente errores de consideración en la interpretación de las curvas de SEV. En el corte de tipo Q el supuesto error en la valoración de ρ_2 de cualquier signo provoca en el cálculo de h_2 (y, por consiguiente, de H) un error de signo opuesto.

Para el cálculo cuantitativo bastante aproximado del error de interpretación de las curvas de SEV de tipo Q en función del error en la valoración de ρ_2 , se pueden utilizar las ecuaciones (51) y (52).

Errores en la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q con apariencia de curvas de dos capas

Como ya indicamos, en las curvas de SEV de tipo Q no se refleja claramente la capa intermedia del corte si su espesor

h_2 es pequeño en comparación con h_1 , o su resistividad ρ_2 se diferencia poco de ρ_3 . Las curvas en este caso aparentan ser de dos capas.

Para $\rho_3 = 0$, cuanto menor es la resistividad de la capa intermedia tanto mayor será su espesor sin que la misma quede reflejada claramente en la curva de SEV (fig. 206). La interpretación de tales curvas de SEV como si fueran de dos capas, lleva consigo un error de cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo. La expresión cuantitativa del error queda expresada por la fórmula (54), de valoración del error de interpretación de las curvas de SEV análogas de tipo K.

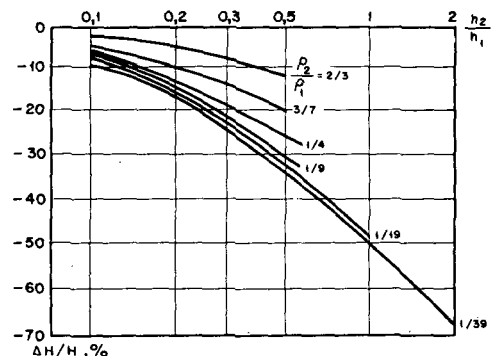
Fig. 206.—Curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$). Valores máximos de h_2/h_1 para los que aún no se refleja la segunda capa en la curva de SEV.



El error tiene siempre signo negativo, porque en el corte de tipo Q es $\rho_2/\rho_1 < 1$. El error absoluto ΔH crece al disminuir ρ_2/ρ_1 , tendiendo en el límite al valor h_2 de la capa intermedia.

En el gráfico de la figura 207 se tiene el error de interpretación calculado mediante la fórmula indicada.

Fig. 207.—Errores de interpretación en las curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$) para el caso de segunda capa poco evidente.



Errores al interpretar las curvas de SEV con ayuda del ábaco de dos capas

El análisis de las curvas calculadas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$) señala que para valores suficientemente grandes de h_2/h_1 ($h_2/h_1 \geq 9$) las gráficas de SEV de este tipo se pueden interpretar con ayuda del ábaco de dos capas, con error menor de -10% , incluso para valores pequeños de ρ_2/ρ_1 .

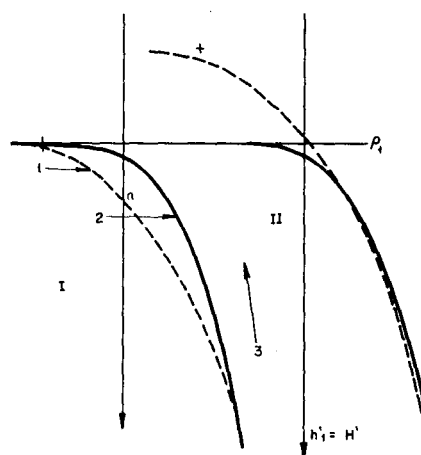
Al aumentar ρ_2/ρ_1 , el límite mínimo del valor de h_2/h_1 , para el que es posible esta interpretación simplificada crece.

Se puede recomendar la siguiente técnica de interpretación de las curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3=0$) con ayuda del ábaco de dos capas.

La curva se superpone sobre el ábaco de dos capas de modo que la línea $\bar{\rho}=\rho_1$ de la misma coincida con el eje horizontal (ρ_1) del ábaco y la parte final de la rama descendente de la curva de SEV quede en contacto con la rama descendente de la curva de dos capas $\mu=0$ (fig. 208).

Fig. 208.—
Ejemplo de interpretación de curva de SEV de tipo Q con ayuda del ábaco de dos capas.

- 1.—Curva que se interpreta;
- 2.—Curva del ábaco de dos capas;
- 3.—Dirección del desplazamiento de la curva de SEV que se interpreta.
- I.—Posición inicial de la curva de SEV para su interpretación.
- II.—Posición final de la curva de SEV para su interpretación.



Entre las curvas queda un cierto espacio n . A continuación, manteniendo el paralelismo entre los ejes del impreso de SEV y del ábaco se desplaza la curva hacia arriba de modo que su rama final no corte en ningún momento la rama descendente de la curva del ábaco. El desplazamiento se interrumpe en el momento en que el intervalo entre ambas curvas desaparece y la curva de SEV que se interpreta tiene el mayor número posible de puntos de su rama final en coincidencia con los de la rama descendente de la curva de dos capas. En esta posición se efectúa la lectura de la profundidad H en el eje de ordenadas del ábaco sobre la escala del impreso de SEV.

El gráfico del error obtenido por la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q con ayuda del ábaco de dos capas (fig. 209) es muy semejante en su forma al gráfico correspondiente para las curvas de SEV de tipo A (fig. 210).

Si suponemos el error de interpretación limitado a -10% , entonces los valores mínimos de h_2/h_1 para los que es posible

la utilización del ábaco de dos capas son aproximadamente los siguientes:

ρ_2/ρ_1	mínimo de h_2/h_1
2/3—3/7	3
1/4	5
1/9—1/39	9

Fig. 209.—Errores en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo eléctrico en curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$), con ayuda del ábaco de dos capas.

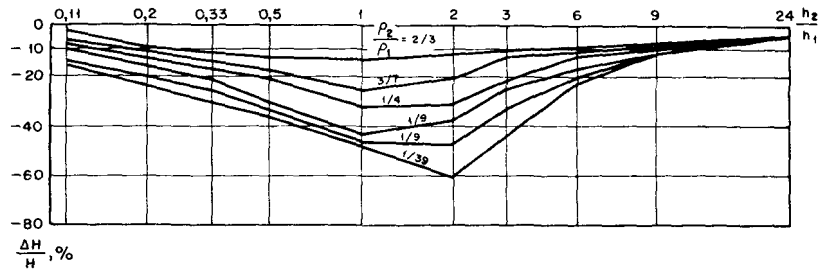
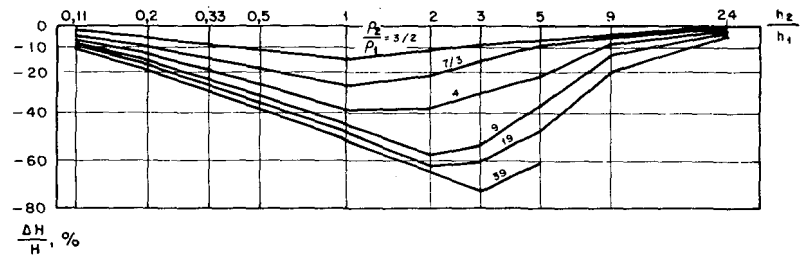


Fig. 210.—Errores en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo eléctrico en curvas de SEV de tipo A ($\rho_3 = \infty$), con ayuda del ábaco de dos capas.



28.2. Interpretación con ayuda del ábaco auxiliar Q y del ábaco de dos capas

La interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo Q con ayuda del ábaco Q (fig. 211) y del ábaco de dos capas no se diferencia en principio en nada de la interpretación de las curvas de SEV de tres capas de los restantes tipos mediante aplicación de los correspondientes ábacos auxiliares.

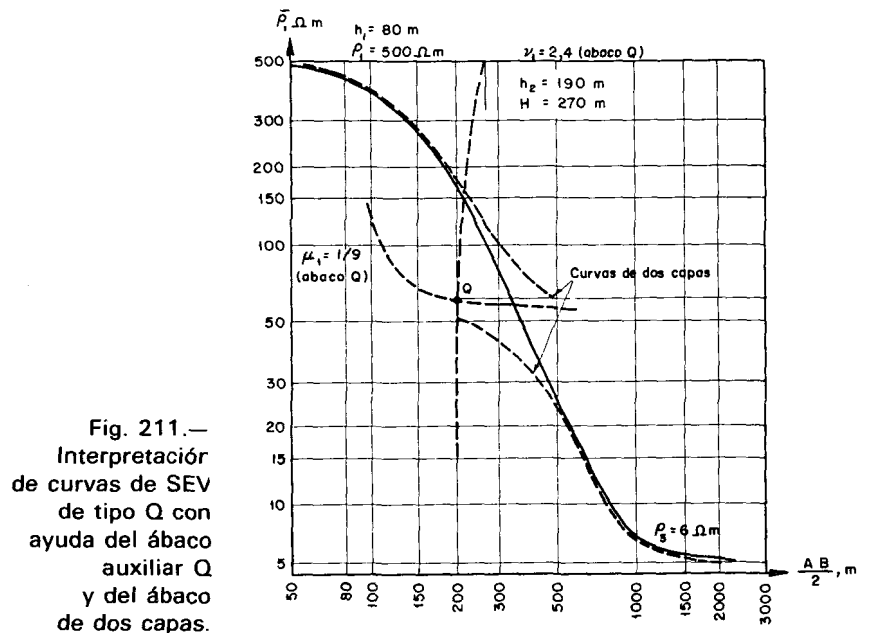


Fig. 211.— Interpretación de curvas de SEV de tipo Q con ayuda del ábaco auxiliar Q y del ábaco de dos capas.

El examen de los resultados de la interpretación de las curvas de SEV calculadas pone de manifiesto las posibilidades de aplicación limitadas de este método.

Como parámetros iniciales suficientemente exactos y $\rho_3 = 0$ se pueden producir errores grandes para h_2/h_1 y ρ_2/ρ_1 relativamente pequeños (fig. 212). Sólo en el caso de $\rho_2/\rho_1 \geq 1/4$ se puede aplicar el método para $h_2/h_1 < 1$. En el gráfico de la figura 213 se tienen los valores mínimos de h_2/h_1 para los que es posible utilizar este método sin que el error $(\Delta H/H) \cdot 100$ sobrepase del 10 al 15%. Como vemos estos valores crecen al disminuir ρ_2/ρ_1 . Así, para $\rho_2/\rho_1 = 1/9$ el valor mínimo de h_2/h_1 que permite la aplicación del método es de casi 1; en caso de $\rho_2/\rho_1 = 1/39$, h_2/h_1 debe ser al menos de 5. Fuera de estos límites se producen errores de interpretación grandes. Si por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 1/9$ y $\rho_3 = 0$ se aplica el método indicado para el caso de $h_2/h_1 = 0,5$ entonces el error en el cálculo de H será del orden de +20 a 30%. Al crecer ρ_3/ρ_1 , permaneciendo fijas las restantes condiciones, el error de interpretación crece aún más. Por ejemplo, en caso de $\rho_3/\rho_2 \approx 0,5$ y ρ_2/ρ_1 cualquiera, el método de interpretación considerado se puede aplicar tan sólo si $h_2/h_1 \geq 5$.

Fig. 212.—Errores de interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo Q ($\rho_3 = 0$) con ayuda del ábaco Q y del ábaco de dos capas.

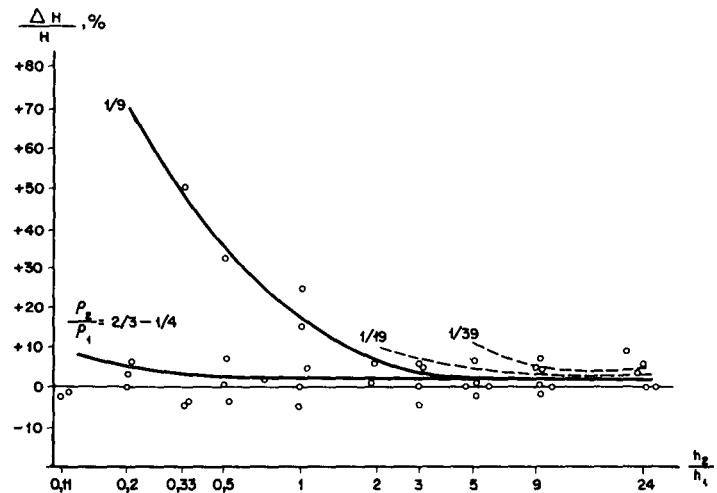
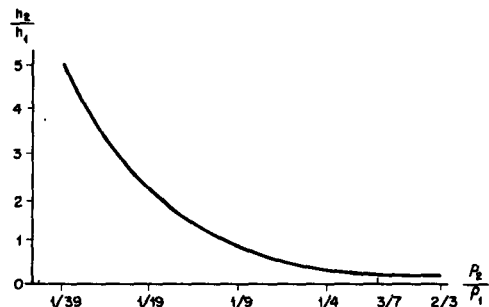


Fig. 213.—Valores mínimos de h_2/h_1 para los que se puede utilizar el ábaco Q y el ábaco de dos capas en la interpretación de las curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$).



28.3. Interpretación con ayuda de los nomogramas de A. I. Bogdanov

Este método se puede utilizar ampliamente para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo Q si en el corte estudiado no es aplicable el principio de equivalencia.

La técnica de interpretación con ayuda de estos nomogramas se ha expuesto anteriormente.

28.4. Interpretación por el método de comparación con curvas de SEV experimentales

La interpretación de las curvas de SEV de tipo Q mediante su comparación con curvas prácticas hechas en el mismo terreno que se explora, para las que se conoce la profundidad del horizonte de apoyo, tan sólo es admisible entre límites bien definidos.

El estudio de D. P. Federov señala que sólo en caso de valores grandes de μ_1 ($\mu_1 \approx 2/3$) este método de comparación puede usarse para una gama de valores de h_2/h_1 , amplia dentro del terreno que se explora. Para $\mu_1 \leq 1/4$ el método de comparación lleva consigo ya grandes errores de interpretación (fig. 214).

Fig. 214.— Resultados de la interpretación de curvas de SEV de tipo Q ($\rho_3 = 0$) por el método de

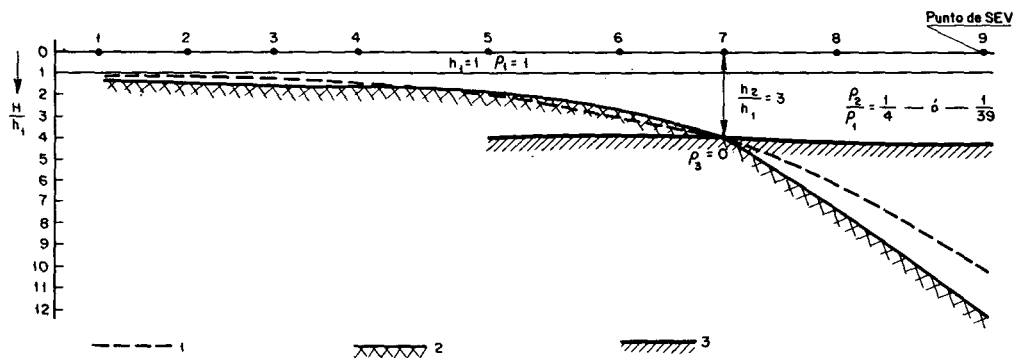
comparación con curvas de SEV calibradas, para ρ_2/ρ_1 constante.

1.—Posición verdadera de la superficie del horizonte de apoyo;

2.—Superficie del horizonte de apoyo fijada por los resultados de la interpretación mediante

comparación con curvas de SEV calibradas para $h_2/h_1 = 3$, en caso de $\rho_2/\rho_1 = 1/4$;

3.—Idem para el caso de $\rho_2/\rho_1 = 1/39$.



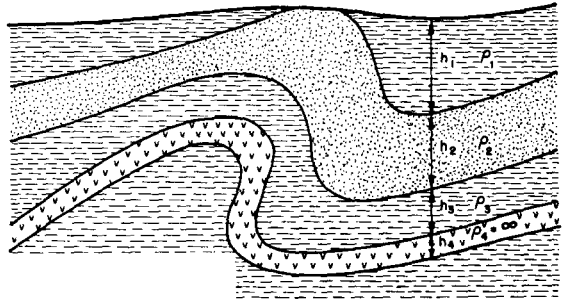
3

CORTE ELECTRICO DE CUATRO CAPAS

**Corte eléctrico
de cuatro capas**

Se denomina corte eléctrico de cuatro capas aquel que presenta tres capas de espesores h_1 , h_2 , h_3 y resistividades ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 y una cuarta que se extiende bajo las anteriores (horizonte de apoyo) de espesor ilimitado y resistividad ρ_4 . También comprende los cortes en que la cuarta capa tiene espesor limitado, pero en la que su resistividad es infinitamente grande ($\rho_4 = \infty$) o infinitamente pequeña ($\rho_4 = 0$) (fig. 215). En estos últimos casos dicha capa puede servir también de horizonte de apoyo eléctrico.

Fig. 215.—Corte eléctrico de cuatro capas con horizonte de apoyo de espesor limitado (Resistividad del horizonte de apoyo infinitamente grande).



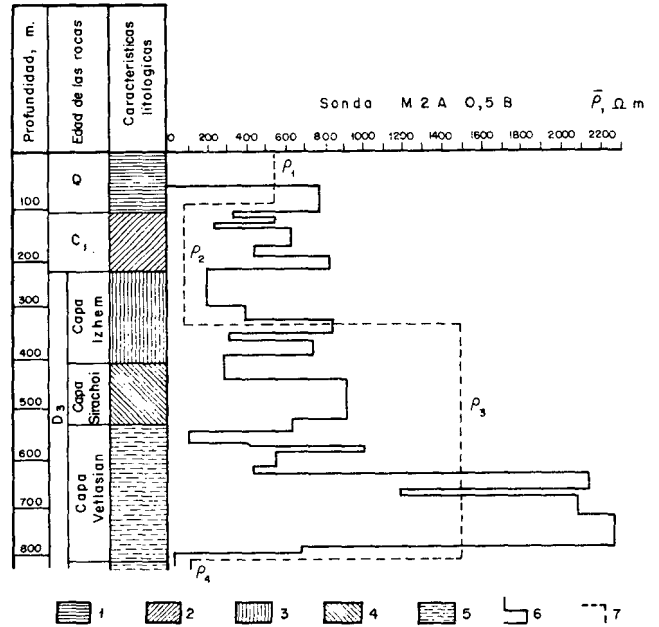
El corte geológico reflejado por una curva de SEV aparentemente de cuatro capas, puede constar no de cuatro capas, sino de otro número distinto de horizontes de edad y características litológicas diversas. A su vez, estos horizontes pueden estar constituidos por capas que poseen resistividades distintas. A pesar de ello, estos complejos de capas (fig. 216) pueden diferenciarse en la curva de SEV en sólo cuatro capas de resistividad distinta, cada una de las cuales engloba a su vez varias subcapas menores que no se reflejan individualmente de un modo claro en la curva de SEV en cuestión.

Los límites entre las capas de diferente resistividad definidas por los resultados de los SEV con frecuencia no coinciden con los límites estratigráficos. A veces incluso la superficie del horizonte eléctrico de apoyo, a causa de grandes diferencias de resistividad dentro de sedimentos de la misma edad, tampoco coincide con límites estratigráficos, lo que puede ser motivo de errores en la interpretación de las curvas de SEV.

Según las diversas combinaciones de las resistividades de las cuatro capas del corte eléctrico se tienen curvas de SEV de los 8 tipos siguientes: KH, QH, HA, AA, HK, AK, KQ y QQ. Las curvas de SEV de los cuatro primeros tipos pertenecen a cortes con horizonte de apoyo eléctrico de resistividad alta (en

Fig. 216.—Corte geoelectrico complejo que se refleja en las curvas de SEV como de cuatro capas.

- 1.—Arenas, tierras arcillosas, arcillas y gravas;
- 2.—Calizas o dolomias, al final arcillas;
- 3.—Calizas, dolomias con intercalaciones de margas y arcillas;
- 4.—Calizas, margas y dolomias;
- 5.—Arcillas en la parte superior, calizas con intercalaciones de arcillas y margas;
- 6.—Resistividad ρ_m y espesor de las capas según los resultados de interpretación de la diagrafia;
- 7.—Resistividad y espesor de los horizontes eléctricos según los resultados de la interpretación de SEV.



particular, $\rho_4 = \infty$); los cuatro últimos, a cortes en que el horizonte de apoyo es conductor (en particular, $\rho_4 = 0$).

29. Abacos de curvas de SEV de cuatro capas

El cálculo de las curvas de SEV de cuatro capas para una serie amplia de cortes eléctricos (como ha sido efectuada para el caso de las curvas de SEV de tres capas) no ha sido realizado. Este cálculo sólo se ha hecho para $\rho_4 = \infty$ o $\rho_4 = 0$, con proporciones diversas entre los parámetros restantes.

Actualmente existe, editada en 1938, la colección de ábacos de curvas de SEV de cuatro capas calculadas por la Oficina Nacional de Exploración Geofísica (VKGR). Contiene 106 curvas de SEV. En los años 1949-1950 se calcularon en el NIIGR, 156 curvas de SEV de cuatro capas. Cien curvas de SEV de cuatro capas han sido calculadas por el método simplificado de G. D. Tsekov. Las curvas calculadas de SEV de cuatro capas están agrupadas principalmente en ábacos con $\nu_2 = h_3/h_1$ variable y constantes las restantes relaciones: $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$, $\nu_1 = h_2/h_1$, $\rho_4 = \infty$.

Estos ábacos de SEV de cuatro capas se han denominado ábacos GP-4 con un número de orden. En las figuras 217 y 218 se tienen ejemplos de los mismos.

El escaso número existente de curvas calculadas de cuatro capas en comparación con el de curvas de SEV de tres capas, se explica por la dificultad de cálculo de las primeras, junto con que para la interpretación de curvas de SEV de cuatro o más capas se utilizan principalmente los ábacos de curvas de tres capas.

Sin embargo, el cálculo de las curvas de SEV es muy útil para comprobar el aspecto característico de los diversos cortes eléctricos de cuatro capas y precisar la construcción por el método gráfico de las curvas de SEV de capas múltiples.

Se han calculado principalmente curvas de SEV de cuatro capas del tipo KH. Las curvas de este tipo se presentan en la práctica con mucha frecuencia; por ello, en la exploración eléctrica suelen predominar los problemas relacionados con su interpretación.

Fig. 217.—Abaco GP-4-30.
 $\rho_2/\rho_1 = 9$;
 $\rho_3/\rho_1 = 1$;
 $\rho_4/\rho_1 = \infty$;
 $h_2/h_1 = 2$;
 $h_4/h_1 = \infty$.

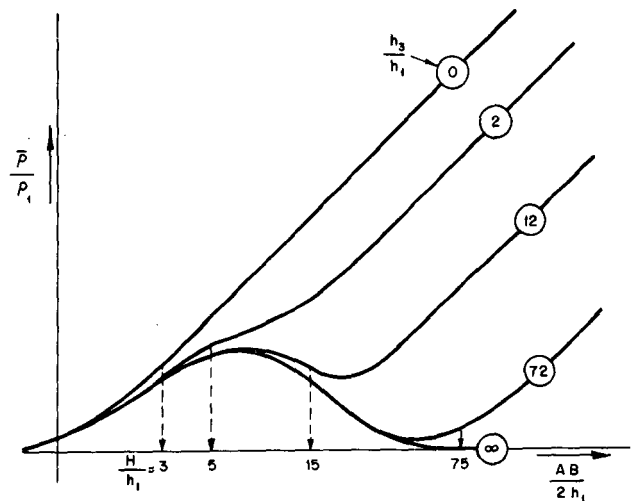
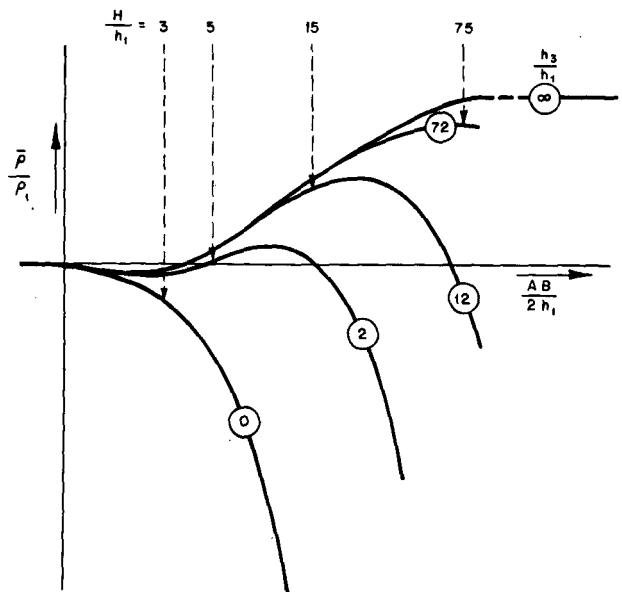


Fig. 218.—Abaco GP-4-42.
 $\rho_2/\rho_1 = 2/3 = 0,667$;
 $\rho_3/\rho_1 = 6$;
 $\rho_4/\rho_1 = 0$;
 $h_2/h_1 = 2$;
 $h_4/h_1 = \infty$.



30. Construcción gráfica de curvas de SEV de cuatro y más capas

Los métodos de construcción gráfica de las curvas de SEV de cuatro y más capas se utilizan ampliamente en la interpretación. A veces incluso se construye un gran número de ábacos de curvas de SEV de cuatro capas que reflejan los cortes según una serie de parámetros correspondientes a una región explorada. Así, por ejemplo, para la interpretación del material de SEV obtenido en la región de Povolzh'ia se construyeron gráficamente más de 360 curvas de SEV de cuatro capas reunidas en 50 ábacos. También se utilizan a menudo los métodos de construcción gráfica para comprobar los resultados de la interpretación y confirmar las particularidades supuestas previamente en el corte eléctrico.

Básicamente en la interpretación de las curvas de SEV de cuatro y más capas se utilizan los mismos métodos que para la interpretación de las curvas de SEV de tres capas. Sin embargo, aquí se emplean principalmente los ábacos de tres capas y sólo para una interpretación más afinada, los de cuatro capas.

Para la construcción gráfica de las curvas de SEV de cuatro capas las mismas son consideradas como constituidas por dos curvas de tres capas: Se supone que la primera refleja las tres capas superiores del corte dado, en el que el espesor de la tercera capa es infinitamente grande. La segunda corresponde a un corte de tres capas en el que el espesor y resistividad de la primera capa coinciden con los de una capa ficticia que sustituye al conjunto de las dos capas superiores del corte dado y la segunda y tercera capas coinciden respectivamente con la tercera y cuarta del corte citado. El espesor y resistividad de la capa ficticia se calculan del mismo modo que en el caso de las curvas de SEV de tres capas, mediante las coordenadas de los puntos H, A, K o Q según la proporción de resistividades de las tres primeras capas del corte dado. La construcción práctica se realiza del modo siguiente.

Sea el corte de cuatro capas siguiente:

$$h_1, h_2, h_3, h_4 = \infty;$$
$$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$$

Consideramos las tres primeras capas del corte suponiendo $h_3 = \infty$. Partiendo de los valores dados h_1, ρ_1 se construye en el impreso de SEV la curva de tres capas correspondiente. Ante todo, se intenta utilizar para ello las curvas de SEV de la colección de ábacos. Si no es posible hallar la curva exigida en la colección ni directamente ni por interpolación, se halla la misma gráficamente. Conocidas las coordenadas del punto auxiliar (x, y) , tomado en función de la variación de las resistividades de las tres primeras capas, reducimos nuestro corte a otro de tres capas:

$$x, h_3, h_4 = \infty;$$
$$y, \rho_3, \rho_4$$

Construimos esta curva de SEV de tres capas igual que en el caso anterior, pero en lugar de tomar h_1, ρ_1 , tomamos como

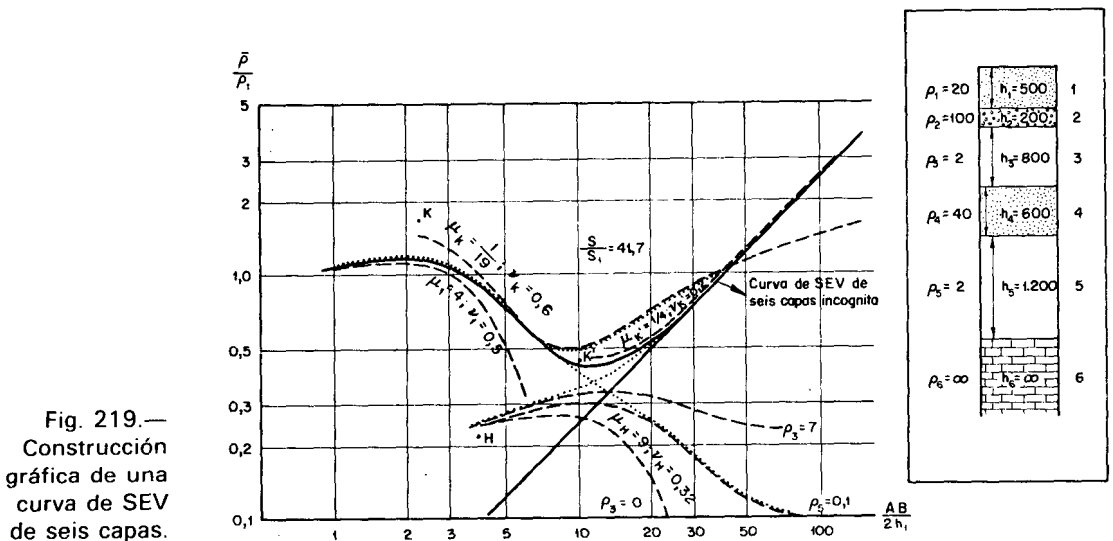
parámetros de la primera capa los de la ficticia, es decir, x e y . Enlazamos a continuación entre sí de modo suave ambas curvas de tres capas. Para precisar el curso de la curva incógnita en la zona de empalme, pueden utilizarse las curvas de SEV de cuatro capas correspondientes a un corte con parámetros contiguos a los dados.

El error de construcción resulta, en general, tanto menor cuanto mayor potencia relativa tengan las capas (h_2/h_1 y h_3/h_1) a igualdad de las restantes condiciones. En la zona de empalme de las ramas de ambas curvas el error puede ser de $\pm 10\%$.

Este método de construcción de curvas de SEV de cuatro capas puede aplicarse a la obtención de las curvas correspondientes a cortes eléctricos de cualquier número de capas. Para ello, se agrupa el corte múltiple y de modo sucesivo en conjuntos de cuatro capas para los que se construyen curvas de SEV. Las curvas halladas o las ramas de las mismas separadas se enlazan entre sí suavemente dando con ello origen a la curva buscada.

Veamos la obtención gráfica de la curva de SEV para un corte de seis capas. El ejemplo que examinamos corresponde a una de las curvas de SEV obtenidas por E. V. Rodponov en la región de Grozny (fig. 219).

Los datos del corte geoelectrico para el que ha sido construida la curva de SEV se incluyen en la tabla 42.



Fue necesaria en este caso la construcción gráfica para apreciar cómo se reflejaría en la curva de SEV cada uno de los horizontes, en particular las cuatro capas de resistividad elevada.

La rama final de la curva buscada debe tener como asíntota una recta que forme ángulo de 45° con el eje de abscisas; $S = 41,7$ mho.

TABLA 42

CORTE GEOELECTRICO DE SEIS CAPAS

Características geológicas de las capas del corte	Espesor (m)	Resistividad (ohm.m)	S (mho)	Corte eléctrico reducido		
				Espesor (m)	Resistividad (ohm.m)	S (mho)
Arcillas, arenas y areniscas apsheronas y akchagylas.	500	20	25	1	1	1
Conglomerado de gravas akchagylas.	200	100	2	0,4	5	0,08
Arcillas sarmatas.	800	2	400	1,6	0,1	16
Paquete arenisco-arcilloso de sedimentos mediterráneos.	600	40	15	1,2	2	0,6
Arcillas chokrakas y maikopas.	1.200	2	600	2,4	0,1	24
Calizas de edad cretácica.	∞	∞	0	∞	∞	0
Profundidad del horizonte de apoyo.	3.300		$\sum S_i = 1042$	6,6		$\sum S_i = 41,68$

Construimos la curva de SEV correspondiente a las primeras cuatro capas del corte dado suponiendo $h_4 = \infty$:

$$h_1 = 1; h_2 = 0,4; h_3 = 1,6; h_4 = \infty;$$

$$\rho_1 = 1; \rho_2 = 5; \rho_3 = 0,1; \rho_4 = 2$$

Según el principio de equivalencia, si tomamos $\mu_1 = 4$ (parámetro del ábaco), tendremos $\nu_1 = 0,4 \cdot 5/4 = 0,5$.

Por consiguiente, puede sacarse la primera curva de tres capas del ábaco 89: $\mu_1 = 4; \nu_1 = 0,5; \rho_3 = 0$. (Al tomar ρ_3 igual a cero en lugar de $\rho_3 = 0,1$, no introducimos ningún error de consideración en la posición de la rama descendente de la curva.)

Con ayuda del ábaco K, calculamos la posición del punto K:

$$x_K = 2,2; \quad y_K = 1,6$$

La segunda curva de tres capas habrá que construirla para el corte.

$$x_K = 2,2; h_3 = 1,6; h_4 = \infty;$$

$$y_K = 1,6; \rho_3 = 0,1; \rho_4 = 2$$

Sin embargo, si calculamos la conductancia longitudinal total S de las capas que descansan sobre el supuesto horizonte de apoyo de este corte, tenemos que S es igual a 17,37 ($S = 2,2/1,6 + 1,6/0,1$), algo mayor que el verdadero valor de S para las tres primeras capas del corte ($S = 17,08$). Esto es debido a que con el punto K utilizado, el espesor de la capa ficticia es siempre mayor que la suma de los espesores de la primera y segunda capa del corte.

Para realizar la construcción de modo más exacto es necesario que el valor S del corte supuesto iguale al verdadero. Ello se puede lograr, por ejemplo, disminuyendo h_3 . El valor corregido de h_3 se halla fácilmente por la condición:

$$\frac{x_K}{y_K} + \frac{h'_3}{\rho_3} = S.$$

En nuestro caso, evidentemente, h'_3 será

$$h'_3 = (17,08 - 1,37) \cdot 0,1 = 1,57$$

Por tanto, la segunda curva de tres capas habrá que construirla para el corte

$$x_K = 2,2; h'_3 = 1,57; h_4 = \infty; \\ y_K = 1,6; \rho_3 = 0,1; \rho_4 = 2$$

Esta es una curva de SEV de tipo H:

$$\mu_K = \frac{\rho_3}{y_K} = 0,062; \nu_K = \frac{h'_3}{x_K} = 0,71; \frac{\rho_4}{y_K} = 1,25$$

Hallamos la misma considerando que μ_K tiene un valor contiguo al del ábaco $\mu_1 = 1/19 = 0,053$ y calculamos el correspondiente valor de ν'_K según el principio de equivalencia:

$$\nu'_K = \frac{0,71 \cdot 0,053}{0,062} = 0,61$$

Utilizamos la curva del ábaco 55: $\mu_1 = 1/19$; $\nu_1 = 0,61$; $\rho_3/\rho_1 = 1$ (tomando $\rho_4/y_K = 1$ en lugar de 1,25 no cometemos, como se verá en la construcción, un error de importancia). Trazamos esta curva en el impreso de SEV haciendo coincidir el origen de coordenadas del ábaco 55 con el punto K .

Reuniendo las curvas de SEV indicadas en una, obtenemos la configuración aproximada de la curva que refleja el corte dado de cuatro capas en el supuesto de $h_4 = \infty$.

Unimos al corte dado la quinta capa, es decir, construimos la curva de SEV para el corte de cuatro capas:

$$x_K = 2,2; h'_3 = 1,57; h_4 = 1,2; h_5 = \infty; \\ y_K = 1,6; \rho_3 = 0,1; \rho_4 = 2; \rho_5 = 0,1$$

en el que el conjunto de las capas 1 y 2 se representan por las coordenadas del punto K .

La primera curva de SEV de tres capas de la construcción pedida se ha hallado ya. Obtengamos la segunda (desde el principio de la construcción ésta será la tercera curva de SEV de tres capas).

Con ayuda del ábaco H calculamos la posición del punto H cuyas coordenadas son el espesor y la resistividad de una capa que sustituye a las capas 1, 2 y 3 del corte dado:

$$x_H = 3,77; y_H = 0,22$$

Por tanto, hay que construir la curva de tres capas que corresponde al corte

$$x_H = 3,77; h_4 = 1,2; h_5 = \infty; \\ y_H = 0,22; \rho_4 = 2; \rho_5 = 0,1$$

Es una curva de tipo K:

$$\mu_H = \frac{\rho_4}{y_H} = 9,1; \nu_H = \frac{h_4}{x_H} = 0,318; \frac{\rho_5}{y_H} = 0,5$$

Construimos la misma mediante interpolación, utilizando los ábacos 60 y 90: $\mu_1 = 9$; $\rho_3/\rho_1 = 1$ y 0 (el origen de coordenadas se hace coincidir con el punto H). El enlace de esta curva con la hallada anteriormente de cuatro capas da una curva que corresponde a las cinco primeras capas del corte en el supuesto de que $h_5 = \infty$.

Como vemos por la disposición de las curvas de enlace, se verifica exclusivamente entre la parte inicial y final de las respectivas curvas de SEV utilizadas.

Introduciremos en el corte la sexta y última capa. Para ello hay que construir la curva de SEV correspondiente al corte de cuatro capas:

$$x_H = 3,77; h_4 = 1,2; h_5 = 2,4; h_6 = \infty; \\ y_H = 0,22; \rho_4 = 2; \rho_5 = 0,1; \rho_6 = \infty$$

Una de las curvas de SEV exigidas de tres capas está ya construida. Para hallar la segunda (cuarta desde el principio de la construcción) calculamos la posición del punto K (para diferenciarlo del primer punto K, designamos a este último por K'), cuyas coordenadas representan el espesor y resistividad de una capa ficticia que sustituye a la totalidad de las capas primera, segunda, tercera y cuarta. Con ayuda del ábaco K y teniendo en cuenta que $\mu_H = 9,1$, $\nu_H = 0,318$, hallamos:

$$x_{K'} = 10; y_{K'} = 0,43$$

Según esto el corte de tres capas para el que hay que construir la curva de SEV, viene definido por:

$$x_{K'} = 10; h_5 = 2,4; h_6 = \infty; \\ y_{K'} = 0,43; \rho_5 = 0,1; \rho_6 = \infty$$

La conductancia longitudinal total de este corte es

$$S = \frac{x_{K'}}{y_{K'}} + \frac{h_5}{\rho_5} = 23,2 + 24 = 47,2$$

Pero el verdadero valor de S en el corte dado es 41,7. Para hacer coincidir la magnitud S del corte ficticio con el anterior disminuimos el espesor de la capa h_5 . El valor h'_5 corregido de la misma, lo calculamos por la siguiente expresión:

$$\frac{x_{K'}}{y_{K'}} + \frac{h'_5}{\rho_5} = 41,7;$$

de donde deducimos $h'_5 = (41,7 - 23,2) \cdot 0,1 = 1,85$.

Por tanto, para el corte corregido, tendremos:

$$\begin{aligned} x_{K'} &= 10; h'_5 = 1,85; h_6 = \infty \\ y_{K'} &= 0,43; \rho_5 = 0,1; \rho_6 = \infty \end{aligned}$$

Tomando $\mu_{K'} = 1/4$, hallamos por el principio de equivalencia

$$\nu_{K'} = 0,185 \cdot 4,3/4 = 0,2$$

Sacamos del ábaco 83 la curva de SEV de tres capas:

$\mu_1 = 1/4$; $\nu_1 = 0,2$; $\rho_3 = \infty$, llevando su origen de coordenadas al punto K' .

La construcción, mediante las dos últimas curvas de SEV de tres capas, de la curva de SEV de cuatro capas, permite definir la parte final de la curva de SEV de seis capas (la rama derecha asintótica y el mínimo). En la figura 219 se ha subrayado con una línea más gruesa la curva definitiva obtenida mediante la construcción gráfica.

Como se aprecia por su aspecto, la curva se asemeja a una de cuatro capas de tipo KH. La cuarta capa, de resistividad relativamente alta, a pesar de su considerable espesor (600 m) no se refleja claramente en la curva. Las capas 3, 4 y 5 quedan señaladas en la curva de SEV como un complejo conductor por un mínimo de $\bar{\rho}$.

La curva de SEV obtenida demuestra que para el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo establecida ($\rho_6 = \infty$, $H \approx 3300$ m) en la región investigada se necesita una separación $AB/2$ de electrodos del orden de 20 km.

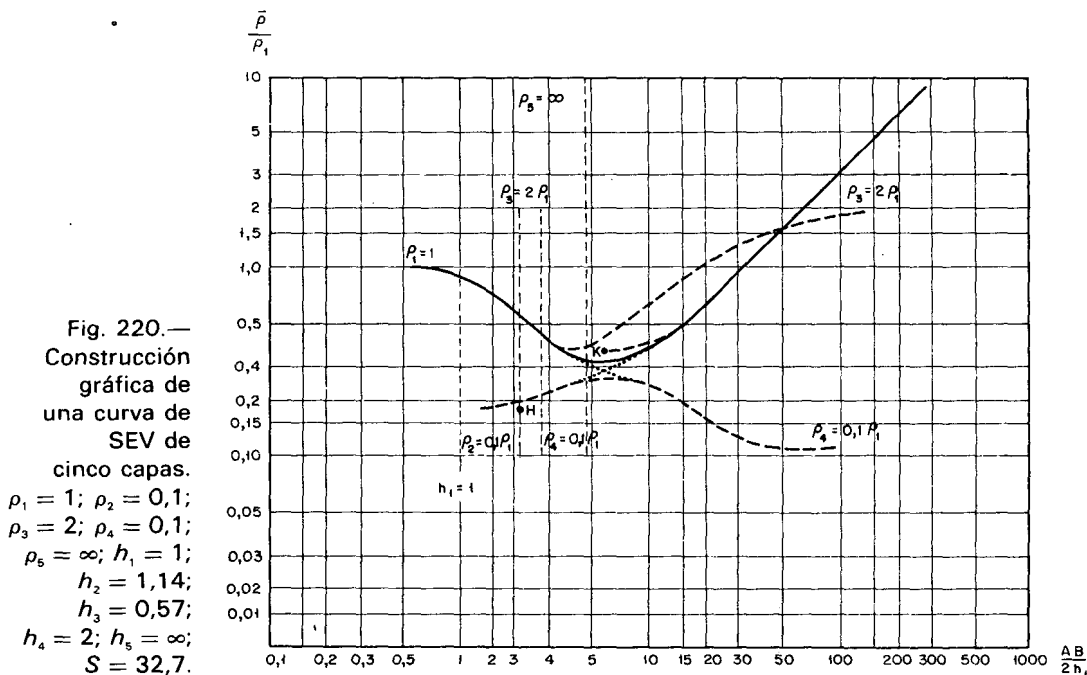
En la figura 220 se muestra otra curva de SEV de la misma región obtenida gráficamente, pero con el supuesto de que la segunda capa de alta resistividad —un conglomerado de grava— no existe en este corte. Por lo mismo se aumentó el espesor del primer horizonte. El espesor de la arcilla sarmata permaneció fijo, el espesor del horizonte de alta resistividad se disminuyó en 200 m, pero para compensar ello se aumentó el espesor de las arcillas chokraka y maikopa. La resistividad de las capas permanece igual que en el caso anterior.

Por consiguiente, el corte eléctrico se transformó en el siguiente de cinco capas:

$$h_1 = 700; h_2 = 800; h_3 = 400; h_4 = 1400; h_5 = \infty$$

$$\rho_1 = 20; \rho_2 = 2; \rho_3 = 40; \rho_4 = 2; \rho_5 = \infty$$

$$S = 1145$$



La profundidad del horizonte de apoyo es la misma que en el caso anterior, $H = 3300$ m. El corte lo referimos a los parámetros de la primera capa.

Como vemos, tampoco en este caso el tercer horizonte (de alta resistividad) se señala en la curva de SEV. Esta última curva tiene aspecto de ser de tres capas de tipo H con un mínimo amplio. Para la determinación del horizonte de apoyo de resistividad infinita es suficiente la separación $AB/2 \approx 15$ km.

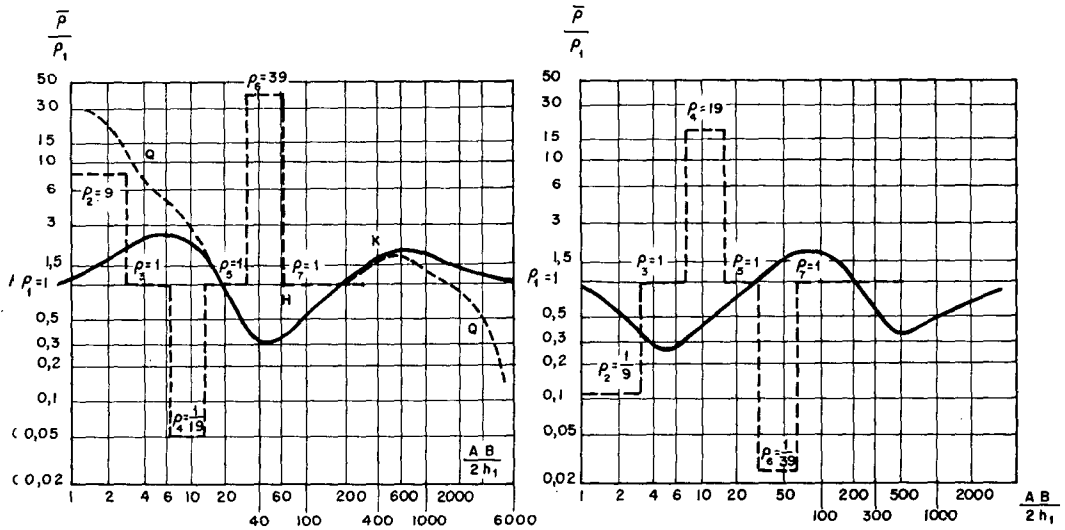
En lo que se refiere a la metodología de la construcción se aprecia que para la obtención de las curvas de SEV de seis capas hay que construir cuatro capas intermedias de SEV de tres capas, para las curvas de cinco capas tres, para las de cuatro capas, como se ha visto anteriormente, dos. De ello se deduce que para la obtención de una curva de SEV de n capas se necesitan construir $n-2$ curvas intermedias de tres capas. También se ve fácilmente que de las curvas intermedias de cuatro capas, obtenidas mediante las de tres, se necesitan $n-3$; otras veces, en el caso más favorable, hay que recurrir también a la determinación del punto auxiliar (H, A, K, Q). Si para el trazado de las curvas de tres capas de SEV intermedias se utiliza el ábaco de dos capas, entonces el número de puntos auxiliares se incrementa en una unidad. Estos puntos, en número de $n-2$, también designan el tipo de curva de SEV. Por ejemplo, las curvas de SEV que reflejan un corte de seis capas se designan con cuatro letras. Por ello, la curva que hemos considerado

anteriormente se designa como de tipo KHKH (en realidad tiene la forma, como hemos visto, de curva de cuatro capas de tipo KH). Las curvas que reflejan un corte de cinco capas, se caracterizan por tres letras; el caso citado más arriba corresponde a una curva de tipo HKH. Conocido el aspecto de la curva de SEV de tres capas que corresponde a una designación dada, se puede siempre definir precisamente el de cualquier curva de SEV de capas múltiples dando su designación. Si, por ejemplo, se trata de una curva de tipo QHKQ, podemos decir cuál es el aspecto de la curva de seis capas del correspondiente corte eléctrico, conociendo el de las cuatro curvas de SEV de tres capas: Q, H, K y Q; basta superponer a la rama final de cada curva la rama inicial de la siguiente.

Sin embargo, no se puede indicar por el aspecto de las curvas de SEV el número de horizontes eléctricos que presenta el corte objeto de estudio. Hemos visto más arriba que, por ejemplo, un corte eléctrico de seis capas puede quedar representado por una curva de SEV con aspecto de curvas de cuatro capas; el corte de cinco capas por una con aspecto de curva de tres capas. En la figura 221 se tienen dos curvas de SEV correspondientes a cortes de siete capas (KQHAK y HAKQH); sin embargo, tienen un aspecto muy claro de curvas de cinco capas (KHK y HKH).

Fig. 221.—
Aspecto de curvas de SEV correspondientes a cortes de siete capas.

- a.— $h_1 = 1$;
 $h_2 = 2$; $h_3 = 4$;
 $h_4 = 8$; $h_5 = 16$;
 $h_6 = 32$; $h_7 = \infty$;
 $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 9$;
 $\rho_3 = 1$; $\rho_4 = 1/19$;
 $\rho_5 = 1$; $\rho_6 = 39$;
 $\rho_7 = 1$.
- b.— $h_1 = 1$; $h_2 = 2$;
 $h_3 = 4$; $h_4 = 8$;
 $h_5 = 16$; $h_6 = 32$;
 $h_7 = \infty$;
 $\rho_1 = 1$;
 $\rho_2 = 1/9$; $\rho_3 = 1$;
 $\rho_4 = 19$;
 $\rho_5 = 1$;
 $\rho_6 = 1/39$; $\rho_7 = 1$.



Construcción de curvas de SEV por los datos de testificación

Con frecuencia, se presenta en la práctica la construcción de curvas de SEV gráficamente por los resultados de diagráfias.

Para ello, como ya se ha dicho, se deben utilizar los datos del STL o de la sonda normal de gradiente, sobre todo para una interpretación exacta de las resistividades paramétricas del corte eléctrico.

Sea, por ejemplo, la interpretación de los datos del STL y de las sondas de potencial y gradiente en un pozo con el

siguiente corte eléctrico típico de seis capas del tipo KQQH (tabla 43).

TABLA 43

RESULTADOS EN LA INTERPRETACION DE LOS DATOS DE TESTIFICACION ELECTRICA Y LATEROLOGO (STL)

Núm. de las capas del corte	h (m)	Laterólogo (STL)					Sonda de gradiente					Sonda de potencial				
		ρ_t	ρ_l	ρ_m	λ	S	ρ_t	ρ_l	ρ_m	λ	S	ρ_t	ρ_l	ρ_m	λ	S
1	6	60	60	60	1,0	0,1	60	60	60	1,0	0,1	60	60	60	1,0	0,1
2	23	750	750	750	1,0	0,03	650	565	606	1,07	0,04	326	300	314	1,04	0,08
3	162	71	54	65	1,19	3,0	133	125	129	1,03	1,29	128	114	121	1,06	1,42
4	159	20	13	16	1,23	12,2	27	19	23	1,19	8,35	48	23,8	33,8	1,42	6,70
5	163	4,20	2,70	3,38	1,25	60,5	2,66	2,46	2,56	1,04	66,2	8,3	5,6	6,8	1,21	29,0
6	∞	—	—	∞	—	—	—	—	∞	—	—	—	—	∞	—	—
	$\Sigma h=513$					$\Sigma S=76$					$\Sigma S=76$					$\Sigma S=37$

Como se ve en la tabla, las capas del corte son anisótropas ($\lambda > 1$). En tal caso, para la construcción gráfica de la curva de SEV, sirven como resistividades de las capas los valores ρ_m de las resistividades medias del medio anisótropo y como espesores los valores λh .

De este modo, los parámetros iniciales para la construcción de la curva de SEV por los resultados del STL serán los siguientes:

Número de las capas	λh	ρ_m	S
1	6	60	0,10
2	23	750	0,03
3	192	65	2,95
4	195	16	12,20
5	204	3,38	60,5
6	∞	∞	

$$\Sigma \lambda h = 659$$

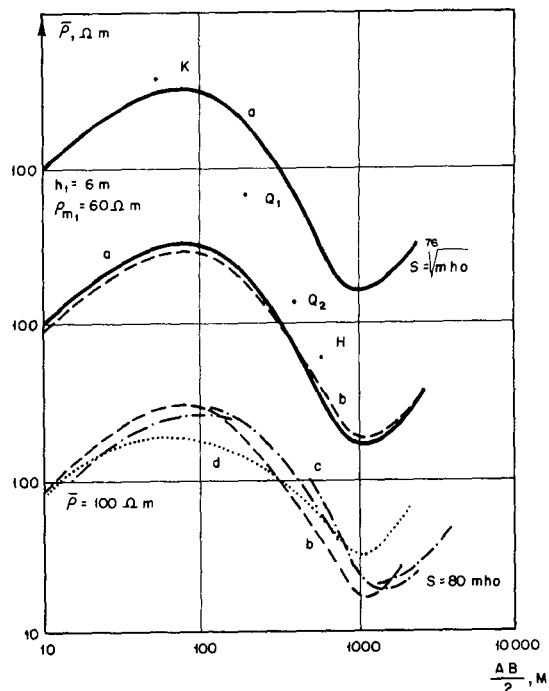
$$\Sigma S = 76$$

La curva de SEV construida según estos parámetros está representada en la figura 222, curva a.

Si se tomaran como base de la construcción de la curva de SEV los resultados de la interpretación mediante la sonda de gradiente, entonces obtenemos una curva (curva b) que se diferencia poco en la práctica de la anterior. Ambas curvas tienen un aspecto análogo al de la gráfica experimental de SEV realizada a cierta distancia del pozo dado (fig. 222, curva c).

La curva de SEV construida según los datos de la testificación con ayuda de la sonda de potencial (fig. 222, d) se diferencia bastante de las curvas obtenidas con los datos del STL y de la

Fig. 222.—Curva de SEV construida gráficamente partiendo de los datos de interpretación de la testificación (Según A. M. Zagarmistr).
 a = STL;
 b = Sonda de gradiente;
 c = Curva de SEV experimental;
 d = Sonda de potencial.



sonda de gradiente, así como de la curva experimental de SEV.

El ejemplo citado, tomado en una investigación efectuada por A. M. Zagarmistr, demuestra claramente que los resultados de la testificación realizada por la sonda de potencial no pueden utilizarse para el cálculo de los parámetros del corte geoelectrico y obtención de curvas de SEV que corresponda a la curva observada.

Para sondeos relativamente poco profundos (AB hasta 6 a 8 km) raramente se encuentran curvas de SEV que manifiesten claramente cortes eléctricos de más de 5 ó 6 capas, siendo lo más frecuente observar curvas de SEV de 4 capas. A este tipo de curva se procura rebajar cualquier curva de SEV más compleja. A su vez la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas se reduce a la de una de tres capas. El problema de la interpretación en este caso consiste en calcular una cierta resistividad media del conjunto de horizontes eléctricos que permita sustituirlos por una capa equivalente.

En el examen de los métodos de interpretación de curvas de SEV de cuatro capas, podemos suponer que el corte eléctrico reflejado por las mismas es realmente de cuatro capas.

31. Propiedades de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA. Condiciones de interpretación para $\rho_4 = \infty$

Este grupo de curvas de SEV de cuatro capas es representativo del corte en que el horizonte de apoyo posee resistividad elevada; en particular ρ_4 puede ser infinitamente grande en comparación con las resistividades de las capas suprayacentes.

Si $\rho_4 = \infty$, entonces la rama derecha de la curva de SEV tiene una asíntota inclinada 45° con el eje de abscisas. Como

sabemos, esta asíntota intercepta en el eje de abscisas ($\bar{\rho} = 1$) un segmento numéricamente igual a la conductancia longitudinal total del corte:

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \frac{h_4}{\rho_4} = \frac{H}{\rho_l}$$

Esta igualdad se cumple para cualquier número de capas del corte, en el caso de que la resistividad del horizonte de apoyo es infinitamente grande.

Por tanto, conociendo la profundidad del horizonte de apoyo en un punto de SEV y conociendo el valor de S por la curva de SEV se puede calcular fácilmente ρ_l , resistividad longitudinal media del corte. Y a la inversa, conociendo ρ_l y S, se puede calcular la profundidad H del horizonte de apoyo en el punto de SEV: $H = S \rho_l$.

La expresión de la profundidad del horizonte de apoyo en el corte de cuatro capas puede también ponerse en la forma

$$H = h_1 \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_1}\right) + h_2 \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_2}\right) + S \cdot \rho_3 \quad (55)$$

Si ρ_3 se diferencia poco de ρ_1 y ρ_2 entonces los dos primeros sumandos de la derecha en la igualdad (55) son pequeños y la magnitud H se diferenciará poco del producto $S \cdot \rho_3$. La parte derecha de la expresión pone de manifiesto que su primer miembro en el caso de corte de los tipos KH o HA puede ser igual a cero (para $\rho_3 = \rho_1$), tener signo positivo (para $\rho_3 < \rho_1$) o negativo (para $\rho_3 > \rho_1$). El segundo sumando siempre tendrá signo positivo en el corte de tipo KH y negativo en el caso de corte de tipo HA. Por tanto, en los casos de cortes de los tipos KH y HA la magnitud $S \cdot \rho_3$ puede ser menor o mayor que la magnitud H.

31.1. Condiciones para la constancia de ρ_l

Calcularemos las condiciones para que la resistividad media longitudinal permanezca constante en el corte de cuatro capas en el caso de permanecer constantes las resistividades paramétricas y poder satisfacer cualquier condición los espesores de las capas del corte.

La resistividad media longitudinal del corte de cuatro capas (supondremos para mayor sencillez referidos los parámetros del corte citado al espesor y resistividad de la primera capa) viene dada por la expresión

$$\rho_l = \frac{1 + h_2 + h_3}{1 + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}} \quad (56)$$

de donde

$$1 + h_2 + h_3 = \rho_l + \frac{h_2}{\rho_2} \cdot \rho_l + \frac{h_3}{\rho_3} \cdot \rho_l \quad (57)$$

En esta última expresión se observa que ρ_1 no depende de h_2 sólo en el caso de que $\rho_1 = \rho_2$. Entonces el valor h_3 debe satisfacer la condición

$$h_3 = \frac{\rho_3(\rho_2 - 1)}{\rho_3 - \rho_2} \quad (58)$$

Fig. 223.—
Condición para la
constancia de ρ_1
en el corte de
cuatro capas,
siendo $\rho_4 = \infty$.

a.—Cortes de los
tipos AA
($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
y QH
($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$);

$\rho_1 = \text{cte} = \rho_2$,

si $h_3 = \frac{\rho_3(\rho_2 - 1)}{\rho_3 - \rho_2}$;

b.—Cortes de
los tipos KH

($\rho_1 < \rho_3$;
 $\rho_2 > \rho_3$) y HA

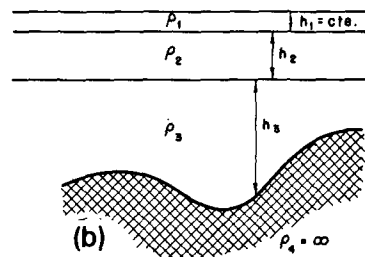
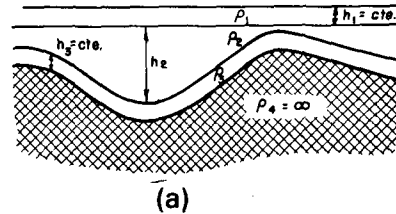
($\rho_1 < \rho_1$; $\rho_2 < \rho_3$);

$\rho_1 = \text{cte} = \rho_3$,

si $h_2 = \frac{\rho_2(\rho_3 - 1)}{\rho_2 - \rho_3}$

y $\rho_3 > \rho_1$ para el
corte de tipo KH

y $\rho_3 < \rho_1$ para
el corte de
tipo HA.



En esta fórmula, la fracción del segundo miembro será positiva si el numerador y denominador tienen el mismo signo, positivo o negativo. En el primer caso es necesaria la condición $\rho_2 > \rho_1$ y $\rho_3 > \rho_2$, que es propio del corte de tipo QH.

Por consiguiente, en los cortes de cuatro capas de los tipos AA y QH con resistividades paramétricas dadas y espesor h_1 , la magnitud ρ_1 permanece constante e igual a ρ_2 para cualquier variación del espesor h_2 (fig. 223, a) si el espesor h_3 no varía y su magnitud satisface la igualdad (58). Esta conclusión no puede ser extendida a los cortes de los tipos KH y HA.

En la expresión (58) se ve que en el caso de corte del tipo AA, el valor constante de h_3 para el que ρ_1 no depende de h_2 , aumenta al disminuir ρ_3 y crecer ρ_2 . En el caso del corte de tipo QH crece al aumentar ρ_3 y disminuir ρ_2 .

Hallemos la condición de constancia de ρ_1 para cualquier variación de h_3 , siendo h_1 y h_2 fijos.

En la fórmula (57) se ve que ρ_1 no depende de h_3 , si $\rho_1 = \rho_3$.

Bajo esta condición $1 + h_2 = \rho_3 + \frac{h_2}{\rho_2} \cdot \rho_3$,

de donde

$$h_2 = \frac{\rho_2(\rho_3 - 1)}{\rho_2 - \rho_3} \quad (59)$$

Análogamente al caso anterior, la expresión (59) tiene significado físico si su parte derecha presenta valor positivo. Esta exigencia queda establecida por las dos condiciones:

$$\rho_3 > \rho_1; \quad \rho_2 > \rho_3 \text{ o } \rho_3 < \rho_1; \quad \rho_2 < \rho_3$$

La primera de ellas corresponde al corte de cuatro capas del tipo KH y la segunda al corte del tipo HA.

Por consiguiente, en los cortes de cuatro capas de los tipos KH y HA con resistividades dadas y espesor h_1 fijo, la resistividad media longitudinal ρ_l permanece constante e igual a ρ_3 para cualquier variación de h_3 (fig. 223, b) y h_2 constante con valor expresado por la fórmula (59), si $\rho_3 > \rho_1$ en los cortes de tipo KH y $\rho_3 < \rho_1$ en los de tipo HA. Esta conclusión no puede ser extendida a los cortes de cuatro capas de los tipos AA y QH.

Por tanto, hay unas condiciones para las que la resistividad media longitudinal de un corte de cuatro capas con resistividades fijas permanece constante, siempre que el espesor de la primera capa sea fijo. Esta conclusión tiene gran valor en la interpretación práctica. Si en la investigación por el método de SEV de una región se puede asegurar que se cumplen las condiciones citadas, entonces las curvas de SEV pueden interpretarse para valor del parámetro ρ_l constante sea cual sea la variación del espesor h_2 (para cortes de los tipos AA y QH) o h_3 (para cortes de los tipos KH y HA).

31.2. Variación de ρ_l en el corte de tipo KH ($\rho_4 = \infty$) en función de los parámetros de las capas

Para aclarar esta dependencia se ha calculado ρ_l mediante la fórmula (56) para una serie de valores de los parámetros h_2/h_1 , h_3/h_1 , ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 del corte indicado y trazada, para todas las combinaciones posibles, la gráfica de la variación de ρ_l/ρ_1 en función de la variación de uno de los parámetros citados, permaneciendo fijos los tres restantes.

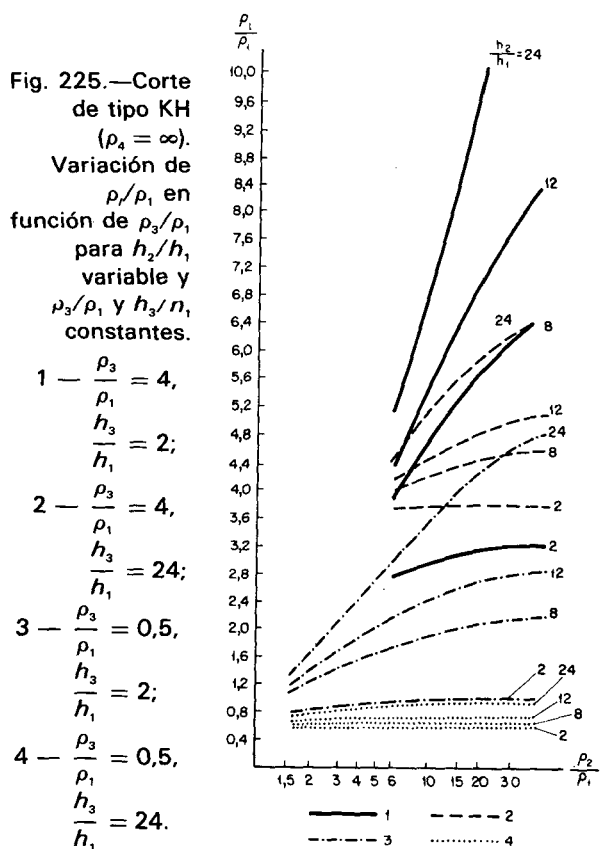
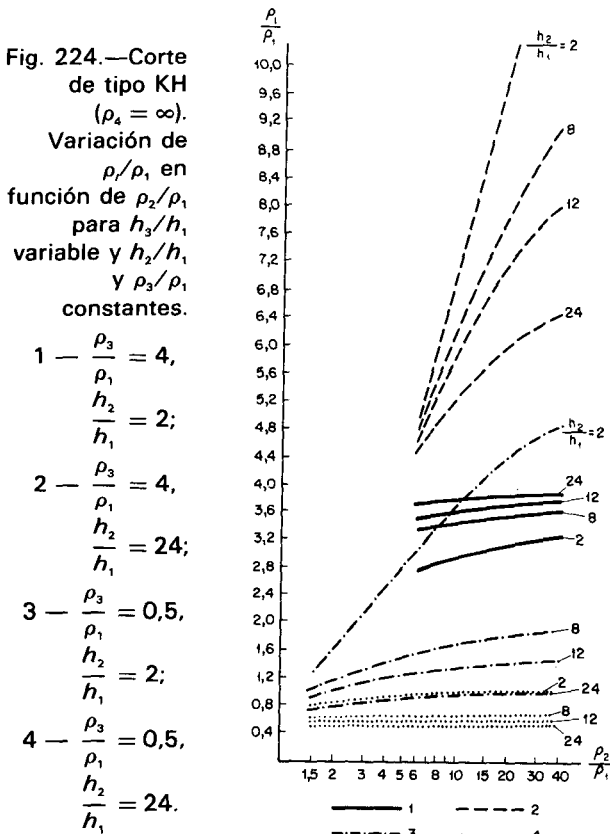
Algunos resultados de la investigación sobre el tema por el científico de NIIGR, H. G. Krolenko-Gorshkov se reflejan en las gráficas de las figuras 224-227.

Tal investigación puede realizarse sobre cortes de cuatro capas y de otros tipos. En la tabla 44 se presenta la variación cualitativa de ρ_l en función del crecimiento de los parámetros h_2 , ρ_2 , h_3 y ρ_3 en todos los casos de corte de cuatro capas para $\rho_4 = \infty$.

TABLA 44

CARACTERISTICA DE LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD MEDIA LONGITUDINAL ρ_l EN EL CORTE DE CUATRO CAPAS ($\rho_4 = \infty$) EN FUNCION DEL CRECIMIENTO DE SUS PARAMETROS

Tipo de corte	Variación de ρ_l con el aumento de los parámetros			
	h_2	ρ_2	h_3	ρ_3
KH	aumenta	aumenta	disminuye	aumenta
QH	aumenta	aumenta	disminuye	aumenta
HA	disminuye	aumenta	aumenta	aumenta
AA	aumenta	aumenta	aumenta	aumenta

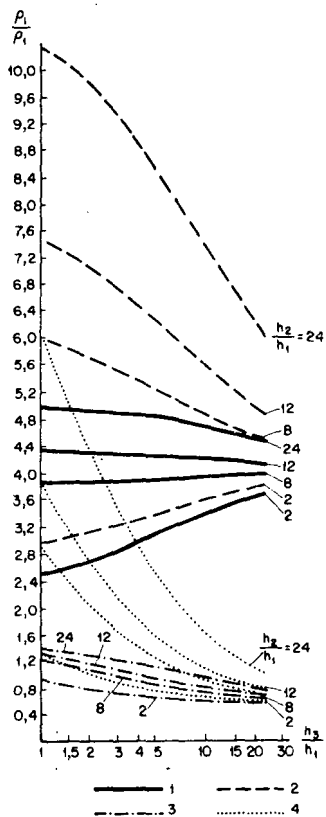


32. Dependencia de la posición de los puntos extremales, en las curvas de SEV de tipo KH, de los parámetros del corte. Cálculo del efecto pantalla de las rocas de alta resistividad

Para el estudio de las curvas de SEV de tres capas de los tipos H y K se analizó con todo detalle la relación entre la posición de los mínimos y máximos de las curvas y los parámetros del corte. Las conclusiones obtenidas pueden extenderse en cierto grado también a los cortes de cuatro capas, siempre que éstos queden reflejados por curvas de SEV con puntos extremales caracterizados. Sin embargo, la relación entre los parámetros de las capas y la posición de los citados puntos extremales es, en este caso, evidentemente más compleja.

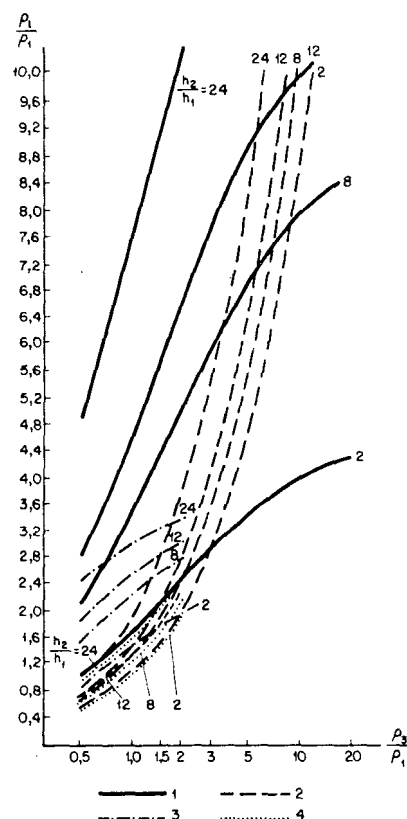
El análisis de las curvas de SEV KH de tipo práctico y calculadas, demuestra que el mínimo de $\bar{\rho}$ queda tanto más

Fig. 226.—
Corte de tipo KH
($\rho_4 = \infty$).
Variación de
 ρ_2/ρ_1 en función
de h_3/h_1 para
 h_2/h_1 variable y
 ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1
constantes.



- 1.— $\rho_2/\rho_1 = 6$,
 $\rho_3/\rho_1 = 4.2$;
- 2.— $\rho_2/\rho_1 = 19$,
 $\rho_3/\rho_1 = 4$;
- 3.— $\rho_2/\rho_1 = 1.5$,
 $\rho_3/\rho_1 = 0.5$;
- 4.— $\rho_2/\rho_1 = 19$,
 $\rho_3/\rho_1 = 0.5$.

Fig. 227.—Corte
de tipo KH
($\rho_4 = \infty$).
Variación
de ρ_2/ρ_1 en
función de ρ_3/ρ_1
para h_2/h_1 ,
variable y h_3/h_1 ,
y ρ_2/ρ_1 constantes.

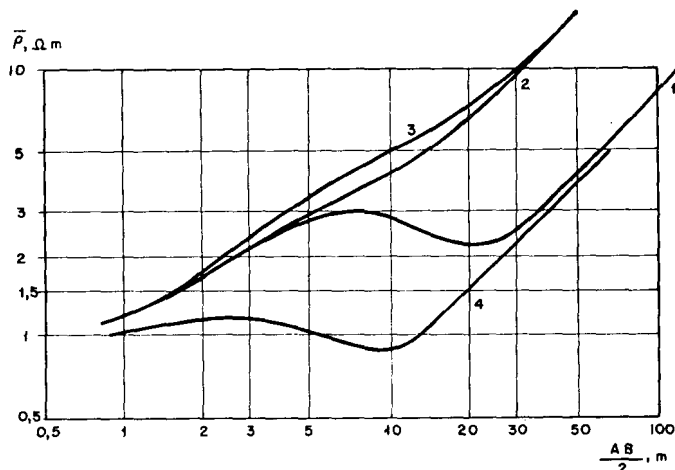


- 1.— $\rho_2/\rho_1 = 39$,
 $h_3/h_1 = 2$;
- 2.— $\rho_2/\rho_1 = 39$,
 $h_3/h_1 = 24$;
- 3.— $\rho_2/\rho_1 = 4$,
 $h_3/h_1 = 2$;
- 4.— $\rho_2/\rho_1 = 4$,
 $h_3/h_1 = 24$.

claramente expresado cuanto mayor es la relación h_3/h_2 y menor la ρ_3/ρ_2 . Por ejemplo, en la figura 228, para las curvas de SEV 1 y 2, la relación ρ_3/ρ_2 es la misma (1/9), pero h_3/h_2 vale 6 y 1 respectivamente; por tanto, el mínimo de $\bar{\rho}$ se señala muy claramente en la curva de SEV 1, mientras que en la curva de SEV 2 no se observa en absoluto. Lo mismo ocurre al comparar las curvas de SEV 1 y 3, para h_3/h_2 igual a 6, pero en las que ρ_3/ρ_2 vale 1/9 y 1/1.5, respectivamente, viéndose perfectamente la gran diferencia de las gráficas.

Sin embargo, sería erróneo concluir que la claridad de expresión del $\bar{\rho}_{min}$ de las curvas está ligado solamente con

Fig. 228.—Curvas
de SEV de tipo
KH. Diferentes
grados en la
claridad de
expresión de
 $\bar{\rho}_{min}$ en función de
los parámetros
del corte.



Curva de SEV	h_1	h_2	h_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3
1	1	2	12	1	9	1
2	1	2	2	1	9	1
3	1	2	12	1	9	6
4	1	2	2	1	1.5	0.17

estas relaciones. También depende de los valores absolutos de h_2 , ρ_2 y h_3 , ρ_3 . Se puede afirmar que, para un mismo valor de las relaciones h_3/h_2 y ρ_3/ρ_2 , el mínimo de las curvas de SEV de tipo KH se aprecia tanto más claramente cuanto mayor es el valor de h_2 y h_3 y menor el de ρ_2 y ρ_3 . Comparando, por ejemplo, la curva de SEV 2 (figura 228) con la curva de SEV 4, para las que h_3/h_2 y ρ_3/ρ_2 permanecen iguales, vemos que la primera no tiene mínimo mientras que en la segunda queda definido claramente. Ello va ligado al descenso de los valores de ρ_2 y ρ_3 en el punto de SEV 4 en seis veces.

Igualmente, la comparación entre las curvas de SEV 5 y 6 (fig. 229), que reflejan cortes con las mismas relaciones $h_3/h_2=1$ y $\rho_3/\rho_2=1/3$, pone de manifiesto la gran diferencia de forma entre ambas, lo que se explica por el aumento en cinco veces de h_2 y h_3 en el punto de SEV 5.

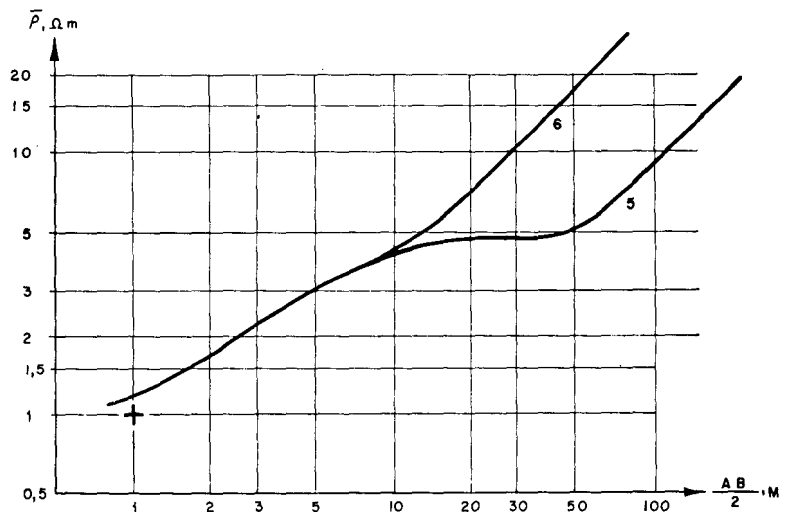


Fig. 229.—Curvas de SEV de tipo A. Diferencia de manifestación de $\bar{\rho}_{min}$.

Curva de SEV	h_1	h_2	h_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3
5	1	15	15	1	5,7	19
6	1	3	3	1	5,7	19

Resumiendo, se puede concluir, que los mínimos de las curvas de cuatro capas del tipo KH se expresan tanto más claramente, a igualdad de otras condiciones, cuanto mayor es la relación h_3/h_2 para h_3 y h_2 máximos, y cuanto menor es ρ_3/ρ_2 , para ρ_3 y ρ_2 mínimos.

Para dar, aunque sea de modo aproximado, una idea cuantitativa de la influencia de los parámetros en la posición de $\bar{\rho}_{max}$ y $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV de cuatro capas, en la tabla 45 se dan los valores de la abcisa y ordenada de estos puntos para los mismos valores de todos ellos excepto uno, en algunas curvas de SEV de tipo KH calculadas y obtenidas por medios gráficos. La escasa gama de variación de los parámetros del corte para los que hay calculadas curvas de SEV no ha permitido realizar una investigación más detallada. Por esta misma causa de escasez o carencia de curvas de SEV de cuatro capas calculadas de otros tipos ha habido que ceñirse exclusivamente a considerar las curvas de SEV de tipo KH.

TABLA 45

INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LOS PARAMETROS DEL CORTE DE TIPO KH EN LA POSICION DE LOS PUNTOS MAXIMOS Y MINIMOS EN LAS CURVAS DE SEV

Parámetros del corte reducidos							$\bar{\rho}_{max}$		$\bar{\rho}_{min}$	
h_1	h_2	h_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	abcisa	ordenada	abcisa	ordenada
influencia de h_2										
1	2	9	1	9	1	11	7	2,9	20	2,3
	3	9	1	9	1	11	9	3,6	23	2,5
	5	9	1	9	1	11	11	4,2	30	3,2
influencia de ρ_2										
1	1	1	1	4	1/9	∞	3,4	1,4	9	1,2
1	1	1	1	9	1/9	∞	4,6	2,1	13	1,7
1	1	1	1	19	1/9	∞	7	2,9	17	2,5
1	1	1	1	39	1/9	∞	10	4	25	3,4
influencia h_3										
1	3	3	1	9	1	11	10	3,8	13,5	3,8
1	3	9	1	9	1	11	9	3,6	23	2,5
1	3	18	1	9	1	11	8,5	3,6	32	1,9
1	3	24	1	9	1	11	8,5	3,6	35	1,8
influencia de ρ_3										
1	2	5	1	9	0,5	11	6	3	18	2,3
1	2	5	1	9	1	11	9	3,2	15	3

Como se observa en la tabla, el aumento de los valores de h_2 y ρ_2 tiene una influencia evidente en las posiciones de los puntos $\bar{\rho}_{max}$ y $\bar{\rho}_{min}$, reflejándose en un crecimiento de la abcisa y ordenada. El aumento de h_3 apenas influye en la posición del punto $\bar{\rho}_{max}$, pero implica un aumento de la abcisa y una disminución de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. También el aumento de ρ_3 influye de igual modo en el crecimiento de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ y abcisa de $\bar{\rho}_{max}$.

En la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas, juega un gran papel el cálculo del parámetro ρ_3 . En las curvas de tipo KH se aprecia que el valor $\bar{\rho}_{min}$, que tiene una relación estrecha con el de ρ_3 , se diferencia claramente de este último y siempre es mayor que él. Tan sólo en caso de valores muy altos de h_3 en comparación con h_2 , el valor de $\bar{\rho}_{min}$ es próximo al de ρ_3 , siempre que ρ_2 sea pequeño.

Se citan, en la tabla 46, los valores de la desviación de $\bar{\rho}_{min}$ respecto a ρ_3 para h_3 elevado, en las curvas de SEV de tipo KH citadas.

Se ve en esta tabla 46 que el valor de $\bar{\rho}_{min}$ se aproxima al de ρ_3 en las curvas de SEV de cuatro capas de tipo KH para valores de h_3 muy grandes y de h_2 y ρ_2 relativamente pequeños.

De esta tabla se deduce también que la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$, que sigue en general las variaciones de la profundidad H del horizonte de apoyo, es mayor que H para valores de h_3 relativamente pequeños y menor que H para h_3 relativamente grande. El crecimiento de h_2 y, sobre todo, ρ_2 conduce al de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ y puede incluso, para h_3 grande, llevar a la inversión de las relaciones indicadas.

TABLA 46

DESVIACION DE LA ORDENADA Y ABCISA DEL PUNTO $\bar{\rho}_{min}$ DEL VALOR DE ρ_3 EN LAS CURVAS DE SEV DE TIPO KH

Parámetros reducidos del corte					ord $\bar{\rho}_{min} - \rho_3$ (%)	abc $\bar{\rho}_{min} - H$ (%)
h_2	ρ_2	h_3	ρ_3	ρ_4	ρ_3	H
2	9	12	1	∞	+ 120	+ 40
24	9	12	1	∞	+ 540	+ 90
3	5,7	20	1,9	∞	+ 42	- 17
3	5,7	45	1,9	∞	+ 17	- 31
3	5,7	100	1,9	∞	+ 6	- 47
5	19	50	3,3	∞	+ 55	+ 7
5	19	75	3,3	∞	+ 33	- 7
5	19	100	3,3	∞	+ 21	- 25
2	1,5	72	1	∞	0	- 60
2	9	72	1	∞	+ 12	- 39
24	1,5	72	1	∞	+ 30	- 23
24	9	72	1	∞	+ 150	+ 24

Cálculo del efecto pantalla de las rocas de elevada resistividad

Al aumentar el espesor y especialmente la resistividad de la segunda capa en el corte de tipo KH, el punto $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV se desplaza a la derecha y hacia arriba.

Se puede apreciar la magnitud de este desplazamiento en función de los parámetros h_2 y ρ_2 , en el corte de tres capas de tipo K, en las figuras 175, 178, 184 y 185. Para la ejecución de SEV en caso de segunda capa con resistividad muy alta, incluso si la misma tiene un espesor muy pequeño, hay que aumentar bastante la separación AB para tener la posibilidad de calcular la profundidad de las capas que yacen debajo. Este efecto de pantalla de la capa de resistividad elevada puede ser tan acusado que para las separaciones AB realizables en la práctica, impida la manifestación de las capas existentes bajo este horizonte en las curvas de SEV. Si, por ejemplo, $h_1 = 360$ m, $h_2 = 40$ m ($\nu_1 = 1/9$) y la resistividad de la segunda capa es 5000 veces mayor que la de la primera, entonces según la gráfica de la figura 180, extrapolando, hallamos la abcisa de $\bar{\rho}_{max} = 32 h_1 \approx 11.500$ m. Por consiguiente, sólo se aprecia el máximo de la curva de SEV para separaciones AB del orden de 23.000 m. Por ello, el tercer horizonte ($\rho_3 = 0$) tan sólo se puede apreciar para separaciones de al menos 30.000 m; en estas condiciones prácticamente no puede lograrse la investigación del cuarto horizonte.

A veces es necesario ver el grado de influencia de este efecto pantalla de una capa de alta resistividad, por ejemplo, en el corte de tipo KH, para calcular la posibilidad de investigación eléctrica de las rocas que yacen bajo dicha capa. En la práctica este problema se presenta en la ejecución de SEV profundos. Examinaremos un método aproximado sencillo para su cálculo, propuesto por A. M. Zagarmistr. Como se verá, este método puede extenderse a cualquier corte eléctrico.

Sea un corte de tipo KH, $\rho_1 \ll \rho_2; \rho_2 \gg \rho_3; \rho_3 \ll \rho_4; \rho_4 = \infty$. Sabemos que el corte de tipo KH puede reducirse a un corte de tres capas de tipo H en el que el espesor y la resistividad de la primera capa se expresan por las coordenadas del punto K (x_K, y_K). En estas condiciones, se puede tomar sin gran error

$$x_K = \text{abcisa } \bar{\rho}_{max}; \quad y_K = \sqrt{\frac{T_2}{S_1}}$$

Supongamos que se quiere realizar un SEV con separación máxima $AB = 30$ km, para que, como es habitual, en la rama asintótica de la curva existan al menos tres puntos. Por tanto, la abcisa del punto de despegue de la curva de SEV deberá ser inferior a 10 km ($x_{p,d} \leq 10$ km).

Se sabe que la abcisa del punto de despegue en las curvas de SEV de tipo H viene dada por la expresión (45),

$$x_{p,d} = 2qH,$$

siendo $H = h_1 + h_2$ y q un coeficiente que depende de μ_1 y ν_1 .

Sustituyendo en la expresión citada h_1 por x_K y h_2 por h_3 , obtenemos

$$x_{p,d} = 2q(\text{abc. } \bar{\rho}_{max} + h_3) \leq 10 \text{ km} \quad (60)$$

Esta expresión fija la condición por la que se puede conocer la posición del horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande, a pesar de la presencia en el corte de una capa de tipo pantalla.

Sea, por ejemplo, un corte en el que $\rho_1 = 20$ ohm.m, con profundidad $h_1 = 500$ m, descansa sobre una capa relativamente delgada de espesor $h_2 = 10$ m y resistividad $\rho_2 = 100.000$ ohm.m; bajo ésta yace una roca conductora de espesor $h_3 = 500$ m y resistividad $\rho_3 = 5$ ohm.m y debajo existen rocas de resistividad infinitamente grande.

Para calcular el valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en la curva de SEV que refleja este corte, utilizamos el gráfico de la figura 181. Para el ejemplo citado, $T_1 = h_1 \cdot \rho_1 = 10^4$; $T_2 = h_2 \cdot \rho_2 = 10^6$; $T_2/T_1 = 10^2$. Tomamos en la gráfica el valor abc. $\bar{\rho}_{max}/h_1 = 14$, de donde abc. $\bar{\rho}_{max} = 7000$ m. Este valor relativamente grande de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ pone de manifiesto ya, que la abcisa del punto de despegue excederá bastante de 10 km y que el estudio del horizonte de apoyo será prácticamente imposible en este caso a causa del efecto pantalla de la capa superior. Tratemos de valorar el valor de $x_{p,d}$.

Para hallar el valor de q en la expresión (60) calculamos h_3/x_K y ρ_3/y_K . Teniendo en cuenta las suposiciones habituales, ponemos $h_3/x_K = 1/14$; $y_K = 200$; $\rho_3/y_K = 1/40$. Por el gráfico de la figura 138 hallamos $q = 1,8$. Por consiguiente, por la fórmula (60) $x_{p,d} = 27.000$ m.

Fácilmente se ve que si se disminuye el valor de ρ_2 en 10 veces ($\rho_2 = 10.000$ ohm.m), permaneciendo constantes los restantes parámetros del corte, la abscisa del punto de despegue disminuirá aproximadamente hasta 10 km. y la investigación del horizonte de apoyo mediante SEV para separación $AB = 30$ km, sería factible.

Hay que advertir que para espesores pequeños de rocas sedimentarias que yacen debajo de la capa pantalla, se puede, con cierta aproximación, considerar el valor de $\bar{\rho}$ en el punto de despegue igual al valor de la ordenada del punto K ($\rho_{p,d} = y_K$). Como el punto de despegue está en la asíntota de la rama derecha de la curva de SEV, en este caso es correcta la expresión $x_{p,d}/y_K = S$.

La resistencia transversal T_1 , de la capa que yace sobre la capa pantalla es pequeña en el caso considerado, en comparación con T_2 , resistencia transversal de esta capa pantalla; asimismo, S_2 es pequeño en comparación con S_1 , por lo que la expresión para $x_{p,d}$ se simplifica a

$$x_{p,d} \approx \sqrt{\frac{T_2}{S_1}} \cdot S$$

siendo S_1 la conductancia longitudinal de la roca que yace sobre la capa pantalla.

La resistividad del nivel pantalla, que habitualmente está formado por sedimentos halógenos (yeso, anhídrita, sal, rocas carbonatadas muy compactas o fuertemente yesíferas), varían dentro del terreno explorado con frecuencia entre límites muy amplios. Ello explica que para la misma separación AB , las curvas de SEV acusan las capas que yacen bajo el nivel pantalla en unos casos y en otros puntos, por el contrario, no se observan. Esto ocurre con frecuencia en la práctica y dificulta el análisis de las curvas de SEV.

Fácilmente se aprecia que el método de valoración del efecto pantalla de la capa de alta resistividad puede aplicarse a cualquier caso de corte eléctrico. Si bajo la capa pantalla se estudia un horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande, sobre el que yace un paquete sedimentario conductor, se reduce el corte dado con ayuda de los puntos auxiliares H, A, K y Q a otro de tres capas de tipo H en el que se calcula el valor posible de la abscisa del punto de separación. Si debajo de la capa pantalla se estudia un horizonte de apoyo conductor, entonces el corte se reduce a uno de tres capas de tipo K y se calcula solamente el valor posible de la abscisa del punto $\bar{\rho}_{max}$.

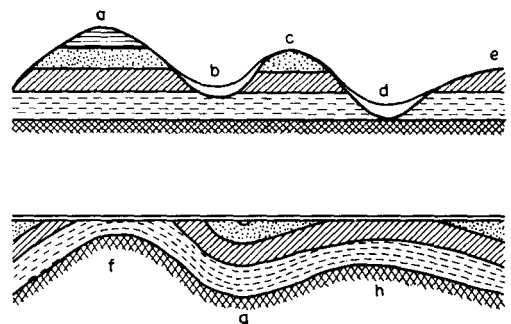
33. Interpretación cualitativa de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA. Cálculo de las resistividades de las capas

En la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de cuatro capas se persigue el mismo fin que en la interpretación de las curvas de tres capas: tener una idea general de la marcha del horizonte de apoyo y de la posible variación de las resistividades en la región explorada. Para ello se recoge normalmente la misma documentación que en el caso del corte de tres capas: planos de tipos de curvas de SEV, planos de h_1 y ρ_1 , planos y perfiles de abscisas y ordenadas de los puntos extremales, de isorresistividades aparentes, de iguales valores S o L , de ángulo de inclinación α de la rama derecha de las curvas con el eje de abscisas y cortes de resistividad aparente. Todos estos planos o perfiles para la interpretación se analizan en estrecha correlación mutua. Veamos algunos ejemplos de utilización de tales planos y perfiles.

Planos de tipos de curvas de SEV.—Como ya se ha indicado, la confección de estos planos, especialmente en el caso de cortes de capas múltiples, juega un gran papel en la interpretación de las curvas de SEV. Sobre la forma de estas últimas influyen muchas causas: marcha del horizonte de apoyo y de las capas que descansan sobre el mismo, fenómenos de descenso y erosión de las capas, sustitución de unas capas por otras, diferentes perturbaciones tectónicas, variación de la resistividad de las capas, relieve de la superficie del terreno, etc.

El horizonte de apoyo yace horizontal en el terreno a-e (figura 230). A causa del relieve derrubiado de la superficie del terreno, nos encontramos con curvas de SEV de aspecto distinto de los diversos puntos del perfil; en el punto *a* se observa una curva de SEV de cinco capas; en los puntos *b* y *e*, de tres capas de tipo distinto; en el punto *d*, de dos capas; y en el punto *c* de cuatro capas. O, por ejemplo, en el caso de superficie del terreno plana, es lógico esperar que la zona *f* —subida del horizonte de apoyo (fig. 230)— dará origen a un tipo de curva de SEV, la zona *g* —hundimiento del mismo— a otro y, por último, la zona *h* a un tercer tipo.

Fig. 230.—
Influencia del relieve de la superficie del terreno y del horizonte de apoyo en el tipo de las curvas de SEV (Según L. P. Dolin).



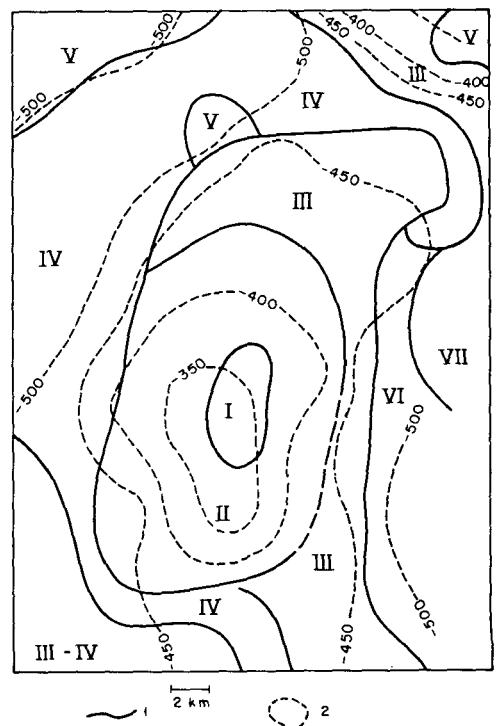
Para la sistematización de las curvas de SEV hay que considerar en primer lugar la diferencia de su forma, número aparente de horizonte eléctrico que se refleja en ella, grado de claridad de expresión de las capas, variación visible de los parámetros, carácter de la rama final de las curvas y otras particularidades externas de las mismas.

Los planos de tipos de curvas de SEV, comparados con planos de relieve de la superficie del terreno y planos geológicos permiten analizar más cuidadosamente la variedad de gráficas de SEV, aclarar la relación entre la forma de las curvas y las diversas causas posibles, subrayar las posibilidades de influencia de la tectónica en la variación del aspecto de las mismas y encauzar la marcha de la interpretación. Los planos de tipos de curvas se van corrigiendo continuamente a lo largo del proceso de interpretación cuantitativa.

Con frecuencia, las curvas de SEV quedan agrupadas dentro de los planos de tipos de curvas, en amplias zonas distribuidas dentro del área explorada. Pueden, por tanto, dar una primera idea general del relieve de la superficie del horizonte de apoyo, de la situación de sus partes menos profundas, extensión de las mismas, dirección de su buzamiento, etc.

En la figura 231 se representa, a título de ejemplo, un pequeño sector de una carta de tipos de curvas de SEV correspondientes a la zona de Saratov del Volga. Como vemos, el sector se agrupa en siete áreas (I—VII). Dentro de cada una de ellas las curvas obtenidas se asemejan en la forma. Se identifican, dentro de cada corte eléctrico, las partes que corresponden a los sedimentos cuaternarios y terciarios, cretácicos, jurásicos y carboníferos. Como horizonte de apoyo eléctrico hay en este caso unas calizas del Carbonífero Medio (principalmente el horizonte Podol'skashirska) de resistividad alta, pero no infinitamente grande. La rama final de las curvas de SEV que corresponden a cortes eléctricos de cuatro y cinco capas, queda, por tanto, inclinada con el eje de abscisas un ángulo menor de 45° . En la zona I, de extensión muy limitada, se engloban las curvas de

Fig. 231.—
Ejemplo de plano
de tipos de SEV.
Saratov del Volga
(Según K. A.
Shajnes).
1.—Límites de
zonas de
presentación de
los diversos tipos;
2.—Isohipsas de
la superficie del
horizonte de
apoyo de alta
resistividad.



SEV de aspecto análogo a las curvas de tres capas de tipo H (fig. 232). En ella afloran areniscas cenomanenses que junto con las rocas albenses dan lugar a valores altos de $\bar{\rho}$ para separaciones pequeñas de AB. A continuación se observa una caída de las curvas que va ligada a la presencia de rocas conductoras de tipo areniscoso-arcillosas del Cretácico inferior y Jura. La rama derecha ascendente corresponde al horizonte de apoyo eléctrico.

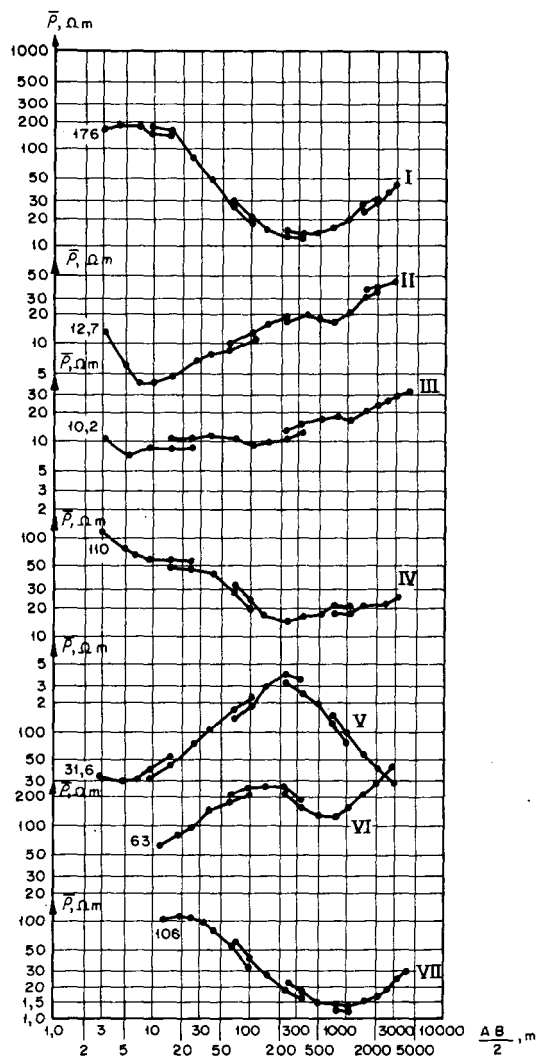


Fig. 232.—Forma de las curvas de SEV en las diversas zonas del plano representado en la fig. 231.

La extensa zona II comprende curvas de SEV asimilables al corte de cinco capas de tipo HKH (fig. 232, II). Según los resultados obtenidos por las perforaciones, la parte izquierda de las curvas corresponden a sedimentos recientes de resistividad baja ($\bar{\rho}_{min} = 4,5$ ohm.m). La rama ascendente que sigue corresponde a la roca anterior de resistividad alta (Cenomanense, Albense) que aflora en la zona I. La caída y mínimo subsiguientes de la curva no están expresadas de modo claro. Ello se supone va unido al hundimiento del Cenomanense y de todas las capas que se extienden bajo el mismo. Como se aprecia la zona II envuelve totalmente a la zona I.

A su vez, la zona II queda envuelta al Norte, Este y Sureste por la zona III. En ella las curvas tienen una forma bastante imprecisa. Ello parece estar relacionado con el aumento de resistividad de las capas que yacen sobre el Cenomanense y de la escasa diferencia desde el punto de vista eléctrico de las capas superiores del corte. Para estas curvas de SEV de la zona III los ángulos de inclinación de la rama final con el eje de abcisas son relativamente pequeños. El aspecto de estas curvas de SEV induce a pensar en un hundimiento de los estratos respecto a la zona II.

Al Norte y Noreste linda con la zona III una banda estrecha de la zona IV; la parte oriental de esta última limita con la zona II. Las curvas de SEV de la zona IV (Fig. 232, IV) acusan en su parte izquierda rocas de edad paleógena, recubiertas por aluviones. Por tanto, el horizonte de apoyo debe estar aquí más bajo que en las zonas I-III, en las que bajo los aluviones se encuentran sedimentos más antiguos. El Paleógeno, que posee en su parte superior una resistividad relativamente alta, da lugar en la parte inicial de las curvas a valores elevados de $\bar{\rho}$; a continuación se presenta un tramo descendente que se relaciona con el Paleógeno Inferior, sedimentos complejos del Cretácico Superior y rocas conductoras del Cretácico Inferior y Jurásico. El horizonte de apoyo se refleja en la rama ascendente poco inclinada respecto al eje de abcisas. Las curvas de SEV de la zona IV son del tipo QH.

En la parcela estrecha de esta zona IV al Sur y Suroeste, se presentan curvas de SEV de aspecto semejante a las de las zonas III y IV. En la zona V se incluyen curvas con un máximo bien definido en su parte izquierda (fig. 232, V). A juzgar por los datos del plano geológico, en ella existen sedimentos paleógenos que suelen presentar resistividad muy alta provocando un efecto de pantalla sobre el horizonte de apoyo.

Fig. 233.—Perfiles $\bar{\rho}$ y S , obtenidos en la región de Soligalich (Según N. A. Karpov).

- 1.—Superficie del terreno y puntos de SEV;
- 2.—Horizonte de apoyo eléctrico de alta resistividad (paquete yesífero del piso Tártaro);
- 3.—Horizonte de apoyo eléctrico de alta resistividad (sedimentos hidroquímicos del tramo Ufim del tramo Kungur);
- 4.—Gráfica de resistividad $\bar{\rho}$ ($\frac{AB}{2} = 2000$ m);
- 5.—Gráfica de la conductancia total S .

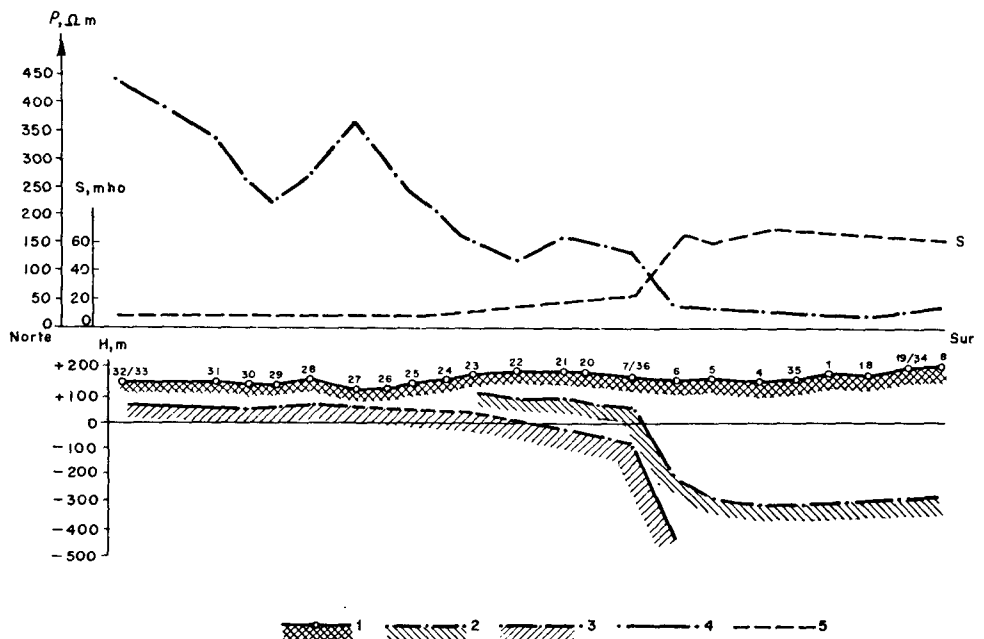
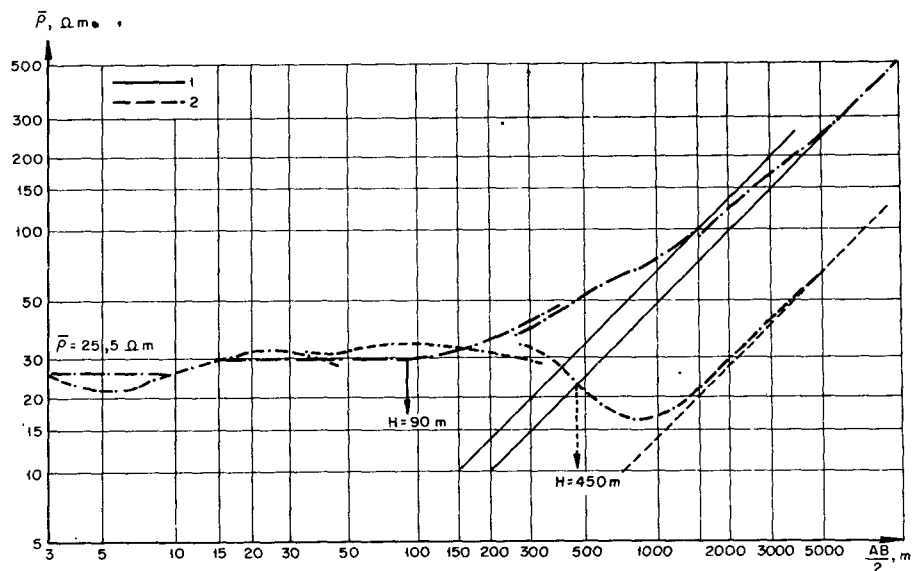


Fig. 234.—Curvas de SEV en zonas de horizonte de apoyo somero y profundo (Región de Soligalich).
1.—SEV 22;
2.—SEV 18.



La zona VI linda con la III al Oeste. Se caracteriza por curvas de tipo KH bastante bien perfiladas. En ella, como señala el mapa geológico, no se presentan sedimentos del Cretácico Superior. Como horizonte eléctrico superior existen materiales cuaternarios; la rama izquierda ascendente de las curvas de SEV del tipo VI corresponden, según parece, a rocas albenses y ocasionalmente al aptense del Cretácico Inferior; el descenso de las curvas, del mismo modo que ocurre para las otras zonas, está relacionada con sedimentos conductores del Cretácico Inferior y Jurásico. El horizonte de apoyo queda señalado por la rama final de las curvas que forma un ángulo elevado con el eje de abscisas.

Las curvas de SEV atribuidas a la zona VII tienen aspecto de curvas de tipo QH. Estas curvas reflejan probablemente el corte completo de sedimentos del Cretácico Inferior y Jura, que poseerá aquí una resistividad algo menor en comparación con la que presentan en la zona VI.

Tales son las distintas variedades de curvas de SEV observadas en la región. Curvas que, como vemos, se caracterizan principalmente por la diferencia de su parte izquierda. Esta diferencia va ligada con las variaciones de los horizontes superiores del corte eléctrico. Cambio de la profundidad del yacente, del espesor y resistividad del Cenomanense en la parte central de la región, presencia de formaciones más modernas (Paleógeno) en su parte occidental y desaparición de los sedimentos del Terciario y Cretácico Superior en su parte oriental. La distribución, bastante regular de las curvas de SEV de los diversos tipos, sugiere la idea de que existe una relación entre dicha distribución y la tectónica de la región. Y, en efecto, el plano estructural hasta el horizonte de apoyo eléctrico, construido según los datos de la interpretación de las curvas de SEV, utilizado en la fijación de los pozos perforados, coincide bastante bien con los planos de tipos de curvas de SEV.

Los planos de tipos de curvas de SEV efectuados mediante análisis cuidadosos de las mismas con ayuda de todos los

datos geológicos y de otro tipo en las regiones de exploración eléctrica, resultan como vemos de gran ayuda para la interpretación.

Gráficas de valores de magnitudes eléctricas y cortes de resistividad aparente

Además de planos, con frecuencia se presentan en el proceso de la interpretación cualitativa de las curvas de SEV, perfiles de diversas magnitudes tomados de las curvas de SEV: ordenada y abcisa de puntos extremales, S y otros. La observación de la variación de estas magnitudes en direcciones determinadas sobre el terreno explorado facilita la interpretación cualitativa y ulteriormente cuantitativa de las curvas de SEV.

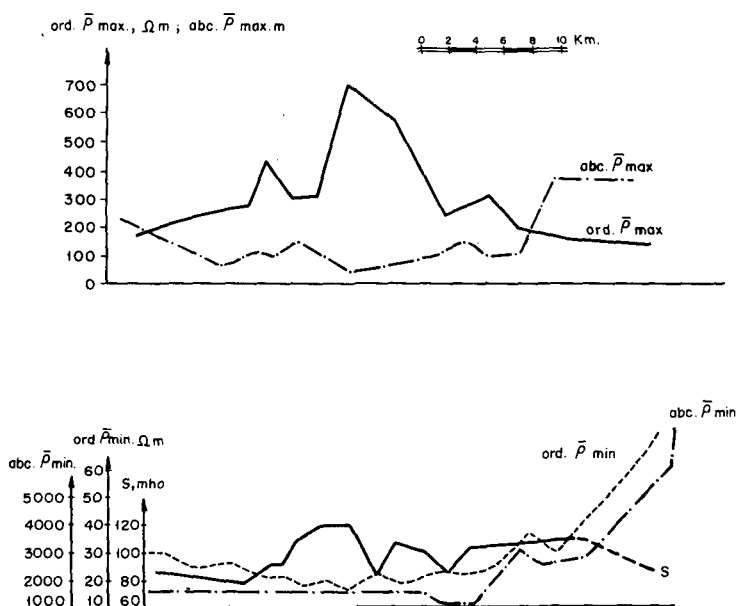
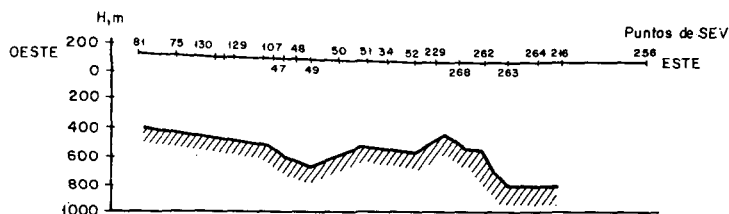


Fig. 235.—Perfiles eléctricos y situación de la superficie del horizonte de apoyo. Parte noroeste de la plataforma rusa.



De gran interés, por ejemplo, son los perfiles (fig. 233) de \bar{p} y S realizados sobre terrenos de la Plataforma Rusa. Estos señalan de modo cualitativo un fuerte descenso de la superficie del horizonte de apoyo resistivo (paquetes yesíferos del piso tártaro y sedimentos hidroquímicos del tramo Ufin y del piso Kungur que se extienden bajo los primeros) de la zona elevada de Soligalich a la región hundida del sinclinal de Moscú. El valor de \bar{p} para separación $AB = 4000$ m, oscila entre 450 ohm.m al Norte y 30 ohm.m al Sur, en que la resistividad aparente permanece casi constante en una extensión de más de 50 km. El valor S varía en menor

proporción y tan sólo entre los puntos de SEV 7/36 y 6 se aprecia un salto brusco de 20 a 70 mho, a partir del cual S apenas varía. En la figura 233 se da también el resultado de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV que confirma asimismo el fuerte hundimiento de la superficie del horizonte de apoyo. Por ejemplo, en el punto de SEV 22 hay hasta la superficie del horizonte de apoyo $H=90$ m, mientras que en el punto de SEV 18 hay $H=450$ m. Las curvas de SEV en estos puntos (figura 234) se diferencian bastante entre sí. La segunda es asimilable al tipo KH, mientras que la primera, que presenta en su parte derecha dos horizontes de resistividad alta, puede serlo a una curva de cinco capas del tipo HKH.

En la figura 235 se presentan dos ejemplos de perfiles de otro tipo de valores obtenidos de las curvas de SEV. Se han dispuesto los puntos de SEV, efectuados en la parte Noroeste de la Plataforma Rusa, en alineaciones, obteniéndose los perfiles citados S de abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ y abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Las curvas de SEV en la región investigada son de cuatro capas, principalmente de tipo HK o de cinco capas de tipo KQH; el horizonte de apoyo es el basamento cristalino precámbrico que posee resistividad infinitamente grande.

Se aprecia un fuerte aumento del valor de ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ en la parte central de la zona estudiada; para esta parte, la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ varía en escasa proporción. Se puede esperar aquí un aumento considerable de ρ_2 con variaciones pequeñas del espesor h_2 (la influencia de h_1 y ρ_1 en la posición de los puntos extremales de las curvas de SEV es, en este caso, muy pequeña). En la parte oriental de la región, aumenta de modo desigual la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ para valores de la ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ decrecientes, lo que hace pensar en esta parte en un aumento del espesor h_2 y en una disminución de la resistividad ρ_2 . En la parte oriental también aumenta bastante la abcisa y ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Esto, probablemente, es motivado por una resistividad creciente de la capa conductora junto con un aumento de su espesor.

La marcha de los perfiles de abcisa y ordenada de los puntos $\bar{\rho}_{min}$ en la parte occidental de la región está probablemente relacionada con una cierta disminución de la resistividad de la capa conductora al Oeste del punto de SEV 50 y al Este a un aumento pequeño de la misma.

La variación de S se podría relacionar con el hundimiento del horizonte de apoyo en los puntos en que S tiene valores máximos y a una subida de dicho horizonte en los puntos en que disminuye ese valor. Sin embargo, debe excluirse la posibilidad de que, por ejemplo, un aumento grande de S en la zona de SEV 47 a SEV 50 pueda ser provocado por un descenso de resistividad en la capa conductora. La constancia e incluso el descenso de S en la parte oriental de la región está provocada probablemente, no porque el horizonte de apoyo permanezca a una profundidad constante o suba, sino por un aumento simultáneo de la resistividad de los sedimentos conductores y de la profundidad del horizonte de

apoyo; esto puede estimarse así sobre todo por la marcha de los perfiles de abcisas y ordenadas de $\bar{\rho}_{min}$.

Todas estas suposiciones sobre la variación de los parámetros del corte hay que confirmarlos por el análisis de las curvas de SEV y su mutua comparación y por la interpretación posterior de las mismas. En la parte inferior de la figura 235 se han dado los resultados de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV correspondientes a la orientación dada. Como se ve, el relieve de la superficie del horizonte de apoyo queda bastante bien reflejado en el perfil S; el perfil de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ también define la posición de esa superficie confirmándose en él, el descenso brusco de la misma en la parte oriental del sector. Para la interpretación cuantitativa se consideró constante la resistividad del horizonte conductor en la mayor parte de la región y tan sólo se aumentó algo en la parte oriental debido a los materiales encontrados en los pozos de investigación y cambio de aspecto de las curvas de SEV.

Los cortes de resistividad aparente son con frecuencia de gran ayuda en la interpretación de las curvas de SEV de cuatro y más capas. Tales cortes dan a veces, al compararlos con los perfiles de interpretación cualitativa, idea bastante clara de la posición del horizonte de apoyo.

Veamos un corte de resistividades aparentes realizado por V. I. Fomin. En la región de estudio, el corte eléctrico (con sedimentos del Cuaternario y Cretácico Superior hasta los del Paleozoico Superior) es de cinco capas del tipo QHA, pero

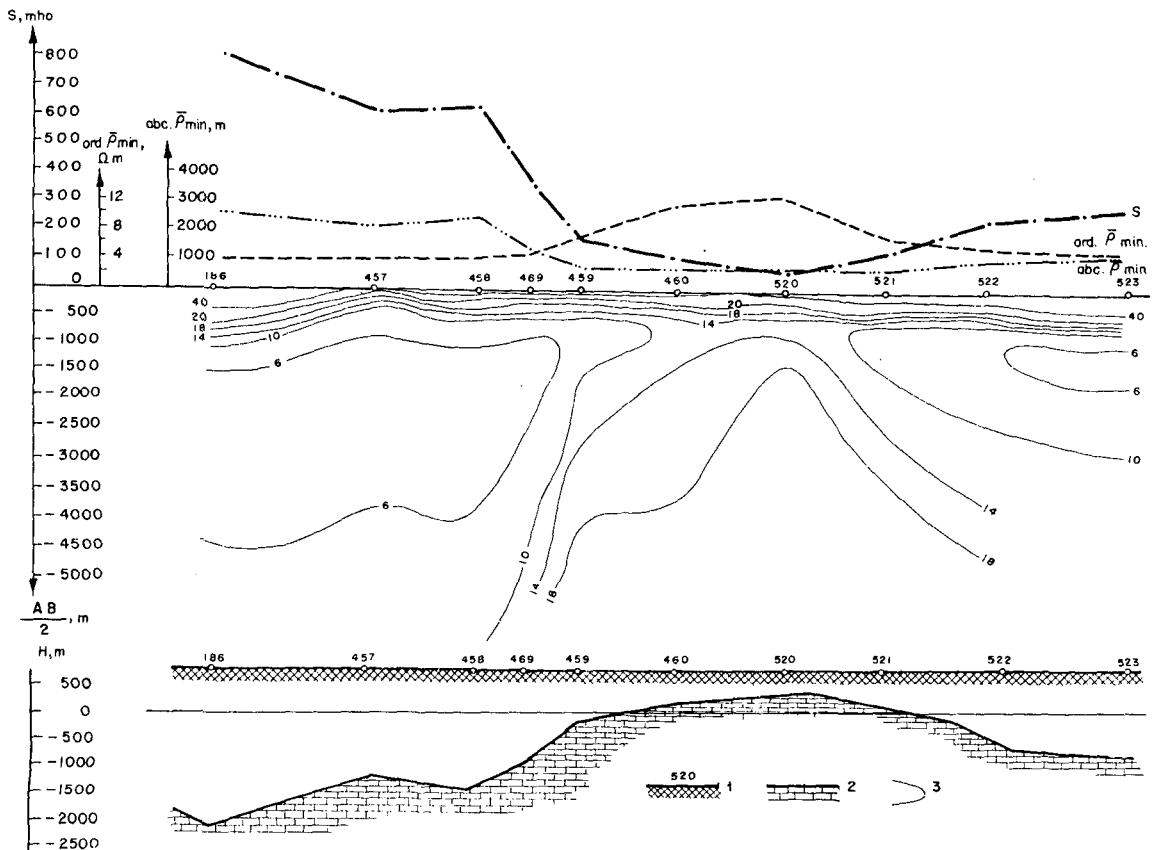


Fig. 236.—Perfiles eléctricos y corte de resistividad aparente (según V. I. Fomin).
 1.—Superficie de terreno y puntos de SEV;
 2.—Superficie del horizonte eléctrico de apoyo;
 3.—Isolíneas $\bar{\rho}$, Ω m.

queda reflejado por las curvas de SEV de cuatro capas de tipo KH y QH principalmente. Como horizonte de apoyo existen rocas metamórficas del basamento paleozoico que poseen resistividad prácticamente infinita.

En la figura 236 se ha representado un corte de resistividad aparente dentro de la zona. Encima del mismo se han establecido perfiles S y de abcisa y ordenada de los puntos de $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV; también debajo de esos perfiles se ha situado la posición de la superficie del horizonte de apoyo, fijada por los resultados de la interpretación cuantitativa ulterior.

La parte central del corte se caracteriza por un aumento del valor de $\bar{\rho}$ (14 a 18 ohm.m); para ella las isolíneas de resistividad aparente suben fuertemente. A ambos lados de esta zona de valores de $\bar{\rho}$ relativamente altos hay amplias extensiones con valores de $\bar{\rho}$ pequeños (6 ohm.m y menos). Las isolíneas de 14 y 18 ohm.m se van alejando hacia abajo en ellas, de un modo particularmente abrupto al Oeste en la zona central. Las zonas que presentan valores bajos de $\bar{\rho}$ van unidas, al parecer, a un aumento de espesor de los sedimentos conductores (también pudiera ser con algún descenso de la resistividad). A ello corresponde un aumento del valor S, de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ y un descenso de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Todas estas magnitudes varían de modo más intenso al Oeste de la parte central de la región. Por el contrario, esta última se caracteriza por valores bajos de S y de abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ y altos de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$.

Es posible hacer la siguiente interpretación cualitativa del corte. En la parte central, el horizonte de apoyo ($\rho_4 = \infty$) está más somero; para la alineación estudiada, el horizonte de apoyo se hunde a ambos lados, evidentemente de modo más fuerte al Oeste que al Este. El hundimiento máximo del horizonte de apoyo se puede suponer queda en el extremo occidental de la región.

Esta conclusión, deducida de modo inequívoco del examen del corte de resistividades aparentes y perfiles citados, se confirma por los resultados de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV.

Cálculo de las resistividades paramétricas de las capas

Para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de cuatro capas hay que conocer en el caso general las resistividades de las capas segunda y tercera del corte (ρ_2 y ρ_3). Si $\rho_4 \neq \infty$ se debe conocer también el valor de ρ_4 , porque para la investigación del corte de cuatro capas raramente se logran llevar los SEV hasta separaciones AB para las que la rama final derecha de la curva alcanzase el valor asintótico de $\bar{\rho}$.

Las resistividades paramétricas se calculan normalmente con ayuda de curvas de SEV efectuadas próximas a perforaciones llevadas hasta el horizonte de apoyo. Todos los datos de testificación (mediante la sonda de gradiente normal) y STL

realizados en la zona investigada son analizados y tomados en consideración para el debido análisis del corte geoelectrico y de todo el material de SEV.

Si en el área investigada o zonas próximas existen afloramientos de alguna capa determinada del corte eléctrico, debe medirse su resistividad mediante perfilaje o SEV poco profundos. Estas medidas no dan, en la mayoría de los casos, valores numéricos que puedan ser utilizados directamente como parámetros de interpretación. Sin embargo, en la práctica son datos necesarios incluso sobre el orden de magnitud de esa resistividad, que se confirma posteriormente por las medidas.

Veamos el modo de calcular ρ_2 y ρ_3 en el caso de las curvas de SEV de cuatro capas realizados próximos a una perforación. El método no se diferencia en principio del que se aplica para las curvas de tres capas, ya que las curvas de SEV de cuatro capas se dividen en el proceso de interpretación en dos de tres capas, cada una de las cuales se interpreta separadamente. En la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV de cuatro capas, se calcula ρ_2 , y en la derecha ρ_3 . El proceso de cálculo de los parámetros se deduce de la metodología de la construcción gráfica de las curvas de SEV.

Estudiando la parte izquierda de la curva dada como de tres capas se hallan, con ayuda del ábaco de dos capas, los valores h_1 y ρ_1 . Esta es una valoración previa de los parámetros de la primera capa que posteriormente pueden ser mejor precisados con la utilización de los ábacos de tres capas. Por los resultados de las perforaciones y testificaciones se calculan las profundidades de las superficies límites de las capas eléctricas y los espesores de las mismas. Conociendo el espesor de la segunda capa h_2 , se calcula $\nu_1 = h_2/h_1$ y en la colección de ábacos de curvas de tres capas calculadas o construidas gráficamente se elige el ábaco adecuado a partir de este valor ν_1 y del más probable de ρ_3 , teniendo en cuenta el aspecto de la curva de SEV y los datos de testificación. Con ayuda de este ábaco se calcula el valor incógnita ρ_2 y se precisan los valores h_1 y ρ_1 . De este modo, quedan fijados todos los parámetros del corte excepto ρ_3 y ρ_4 .

Utilizando el correspondiente ábaco auxiliar H, K, Q o A, según el tipo de la primera curva de tres capas, se halla, por los valores μ_1 y ν_1 , la posición del punto cuyas coordenadas expresan el espesor y la resistividad de la capa equivalente a las dos primeras del corte. Para ello, se transfieren al impreso de SEV las curvas μ_1 y ν_1 del ábaco. El corte dado de cuatro capas se reduce de este modo a un cierto tipo de corte de tres capas.

Se calcula $\nu_1 = h_3/x$, siendo h_3 el espesor de la tercera capa en el corte dado y x la abcisa del punto que determina el espesor de la capa equivalente al conjunto de las dos primeras (ν y x se suelen expresar con subíndices correspondientes al punto auxiliar dado). A continuación se procede del mismo modo que en el caso de la interpretación de cualquier curva de SEV

de tres capas, conociendo el parámetro ν . Para este parámetro y el valor más probable de ρ_4 se elige un ábaco de tres capas y con ayuda del mismo y del modo habitual, se calcula ρ_3 . Para ello se hace coincidir el origen de coordenadas del ábaco con el punto auxiliar señalado.

Puede ocurrir que la coincidencia de la curva de SEV de tres capas que se interpreta con una de las curvas del ábaco no sea satisfactoria. En este caso se admite la posibilidad de desplazar el origen de coordenadas del ábaco con relación al punto auxiliar normalmente a lo largo de la línea ν_1 , lo que supondría un posible error en el cálculo de μ_1 .

Se señala en el impreso de SEV la posición del origen de coordenadas del ábaco de tres capas, con el que se logra interpretar de modo suficientemente preciso la parte derecha de la curva de SEV dada, es decir, calcular ρ_3 y ρ_4 . Esta será la posición corregida del punto auxiliar. Partiendo de la misma y con ayuda del correspondiente ábaco auxiliar, se calcula el dato μ_1 corregido y de aquí ρ_2 . Puede ocurrir entonces que el desplazamiento del punto auxiliar haga variar también algo ν_1 , lo que implica alguna variación de h_2 . Si esta variación es pequeña (± 10 a 15% del valor de h_2 obtenido en el sondeo mecánico), entonces se puede ignorar. En caso de una mayor diferencia entre el valor de h_2 inicial y el corregido, debe repetirse toda la interpretación de la curva, pero utilizando en este caso el valor de ρ_3 conocido y analizando de nuevo la exactitud en el cálculo de los límites de separación de las capas eléctricas mediante la comparación con los datos de sondeos mecánicos y testificación de los mismos.

Veamos un ejemplo práctico.

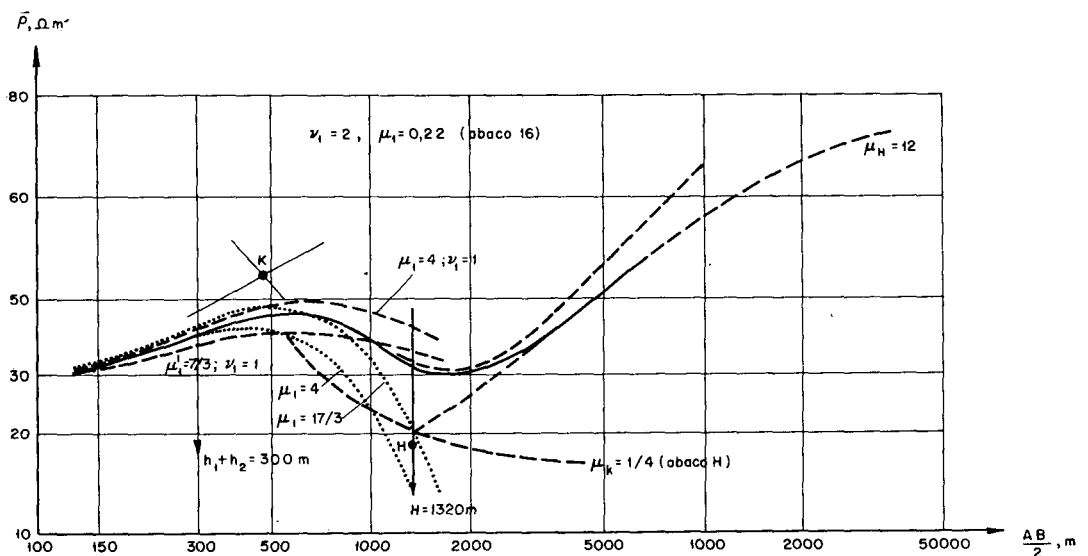


Fig. 237.—Cálculo de los parámetros ρ_2 y ρ_3 mediante las curvas de SEV de tipo KH próximas a un sondeo mecánico.

Sea una curva de SEV de tipo KH (fig. 237) efectuada próxima a un sondeo mecánico, para el que, según los datos de la testificación, la profundidad del horizonte de apoyo eléctrico conductor se puede tomar igual a 300 m, mientras que la profundidad del horizonte de apoyo de alta resistividad es igual a 1.320 m.

Los datos de la testificación ponen de manifiesto la relativamente baja resistividad del horizonte de apoyo. También se aprecia en la curva de SEV que la resistividad del mismo no es infinitamente grande.

Con ayuda del ábaco de dos capas, calculamos $h_1 = 150$ m, $\rho_1 = 30$ ohm.m. De aquí deducimos $h_2 = 300 - 150 = 150$ m, $\nu_1 = h_2/h_1 = 1$.

Para hallar ρ_2 consideramos solamente la parte izquierda de la curva dada, es decir, suponemos que tratamos con una curva de tres capas de tipo K. Dado que la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de la curva dada es igual a ρ_1 , se puede suponer que $\rho_3 < \rho_1$. En la colección de las curvas calculadas de tres capas de tipo K se tienen curvas con parámetro $\rho_3 = 0$ y $\rho_3 = \rho_1$. Supongamos condicionalmente $\rho_3 \approx \rho_1$.

Dado que $\nu_1 = 1$, podemos hacer uso del ábaco 7. Superponiendo la parte izquierda de la curva de SEV dada con este ábaco, estimamos que la rama inicial (ascendente) de nuestra curva está situada entre las curvas teóricas de módulos $\mu_1 = 7/3$ y $\mu_1 = 4$. Pero, sin embargo, la marcha de la rama descendente no se ajusta a la de las ramas de las curvas calculadas. De ello se puede concluir que la suposición de que ρ_3 sea igual a ρ_1 es errónea. Probablemente, ρ_3 es bastante menor que ρ_1 . Supongamos el caso extremo de $\rho_3 = 0$. Entonces comprobamos que en el ábaco 9 la rama izquierda de nuestra curva queda entre las correspondientes curvas teóricas de módulos $\mu_1 = 17/3$ y 4, mientras que la rama descendente no se ajusta a ninguna de las teóricas. Por consiguiente, deducimos que el valor de $\rho_3 \gg 0$ y estará entre 0 y ρ_1 .

Si dispusiéramos de una serie de ábacos de tipo K obtenidos gráficamente para diferentes $\rho_3/\rho_1 < 1$, podríamos hallar una curva de SEV que para $\nu_1 = 1$ correspondiera suficiente bien con la parte izquierda de la curva de SEV dada y entonces calcularíamos con exactitud suficiente la incógnita μ_1 y de ella el valor de ρ_2 . No teniendo tales ábacos, hallamos μ_1 como la media aritmética de los valores indicados. Este valor es próximo a 4. Por consiguiente, $\rho_2 = \mu_1 \cdot \rho_1 \approx 120$ ohm.m.

El error en la valoración de ρ_2 depende en gran medida del error en la estimación de ρ_3 . Este error, como sabemos (figuras 191 y 192), aumenta al disminuir h_2/h_1 .

Para el cálculo de ρ_3 consideraremos la parte derecha de la curva. Esta parte tiene aspecto de curva de SEV de tres capas de tipo H. El espesor y la resistividad de la primera capa vienen dados por las coordenadas del punto K. Hallamos su posición con ayuda del ábaco K y teniendo en cuenta que $\mu_1 = 4$; $\nu_1 = 1$; $x_K = 470$; $y_K = 60$, se obtiene

$$\nu_K = \frac{h_2}{x_K} = 1.020/470 = 2,16$$

Ahora, localizamos el ábaco de tres capas correspondiente a $\nu_1 = \nu_K = 2,16$ y $\rho_3/\rho_1 = \rho_4/y_K$.

Pero ρ_4 es desconocido y los ábacos de tres capas se han calculado para $\rho_3/\rho_1 = \infty$ y $\rho_3 = 1$. Si dispusiéramos de ábacos de curvas de SEV construidas gráficamente para $\nu_1 = 2,16$, diferentes ρ_2/ρ_1 y serie de valores $\rho_3/\rho_1 > 1$, podríamos hallar la curva de SEV correspondiente a nuestra curva de tres capas de tipo H. Como sólo disponemos de los ábacos calculados, únicamente podemos partir de $\rho_4 = \infty$, es decir, tomar este valor como verdadero. Entonces, utilizando el ábaco 16 ($\nu_1 = 2$), hallamos mediante interpolación, que la curva que da una coincidencia mejor con la rama descendente y el mínimo de nuestra curva (el origen de coordenadas del ábaco se encuentra siempre en el punto K) es la de módulo $\mu_1 = 0,22$. Pero en el caso estudiado ν_1 no es igual a 2, sino a 2,16. Hallemos el valor corregido de μ_1 :

$$\mu_1 = \frac{0,22 \cdot 2,16}{2} \approx 0,24$$

Por consiguiente,

$$\mu_K = \frac{3}{60} = 0,24$$

de donde $\rho_3 = 14,5$.

Tomando $\rho_4 = \infty$, evidentemente tendremos un error en el sentido de disminuir ρ_3 . Este error será tanto mayor cuanto menor sea la relación h_3/x_K .

El valor de ρ_3 se podría calcular de otro modo. Por la metodología de la construcción gráfica de las curvas de SEV de tres capas de tipo H se sabe que si la rama final derecha de la curva de SEV se hace coincidir con una curva del ábaco de dos capas, el origen de coordenadas de éste queda situado en esa posición en el punto H de Hummel por el que pasa la curva $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\nu_1 = h_2/h_1$ del ábaco H. Por tanto, conocido el punto inicial K de nuestra curva y la profundidad hasta el horizonte de apoyo $H = 1.320$ m, se puede hallar la posición del punto de Hummel en la recta $AB/2 = 1.320$ y con ayuda del ábaco H deducir el valor μ_K de la curva que pasa por el punto H. Esto solucionará el problema del cálculo de ρ_3 .

Colocamos el origen de coordenadas del ábaco de dos capas sobre la recta $AB/2 = 1.320$. Trasladando el mismo sobre ella conservando los ejes rigurosamente paralelos, vemos que la rama final de las curvas de SEV de cuatro capas coincide de modo óptimo con la curva de módulo 12 del ábaco (fig. 237). Llevamos al impreso la posición del origen de coordenadas del ábaco (punto H). Tan sólo queda que hallemos la línea μ_K que pasa por este punto H. Para ello, el origen de coordenadas H del ábaco se hace coincidir con el punto K. Por el punto señalado pasa la línea $\mu_K = 0,24$, es decir, hallamos el mismo resultado que anteriormente, $\rho_3 = 0,24 \cdot 60 \approx 14,5$. Los valores verdaderos de las resistividades paramétricas en el punto de SEV investigado son $\rho_2 = 120$ y $\rho_3 = 15$ ohm.m.

De modo semejante se calculan los valores ρ_2 y ρ_3 en cualquier caso de curva de cuatro capas. Tan sólo, y según el tipo de curva de SEV, se utilizan diferentes ábacos de curvas de tres capas calculadas o construidas gráficamente y los correspondientes ábacos auxiliares. Los errores en el cálculo de los parámetros indicados dependen de la exactitud en la valoración previa de la resistividad ρ_3 y en el cálculo de ρ_4 .

Los errores en el cálculo de ρ_2 y ρ_3 no deben ser mayores del ± 10 al 15% para medición prácticamente exacta de $\bar{\rho}$, buena precisión de dibujo de las curvas y otros errores insignificantes. Si las resistividades paramétricas se han valorado en cantidad suficiente de puntos de SEV de la zona explorada, entonces se suelen hacer planos en que se agrupan los puntos con los mismos valores, utilizándose dichos planos para el proceso interpretativo.

El cálculo de ρ_3 en el caso de curvas de SEV de cuatro capas de los tipos KH, QH, HA y AA se facilita bastante si $\rho_4 = \infty$. En este caso puede reducirse el cálculo a la valoración de h_1 , ρ_1 y ρ_2 en la parte izquierda de la curva de SEV. Del impreso de la misma se toman el valor de la conductancia longitudinal total S del corte:

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}$$

Conociendo el espesor de todas las capas y ρ_1 y ρ_2 es fácil calcular ρ_3 :

$$\rho_3 = \frac{h_3}{S - \frac{h_1}{\rho_1} - \frac{h_2}{\rho_2}}$$

Si para $\rho_4 = \infty$ las curvas de SEV están mal definidas o la agrupación en capas del corte eléctrico es imposible por una u otra razón, se calcula sólo la profundidad H del yacente, mediante los resultados de perforación o por medio de la exploración sísmica, y como parámetro para la interpretación de las curvas de SEV se estiman los valores de la resistividad media longitudinal del corte ρ_l . Para ello, en las curvas de SEV paramétricas se toman los valores de S , hallándose ρ_l por la proporción $\rho_l = H/S$.

Si el cálculo de ρ_l con ayuda de sondeos mecánicos situados suficientemente alejados entre sí pone de manifiesto una constancia relativa de su valor, entonces se toma la media aritmética de los mismos calculándose la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo en cada punto de SEV como el producto $S \cdot \rho_l$.

En caso de variación de ρ_l entre los puntos de sondeo mecánico, se hallan mediante interpolación los valores intermedios de este parámetro en los puntos de SEV, confeccionándose con frecuencia planos de valores de ρ_l para el terreno explorado.

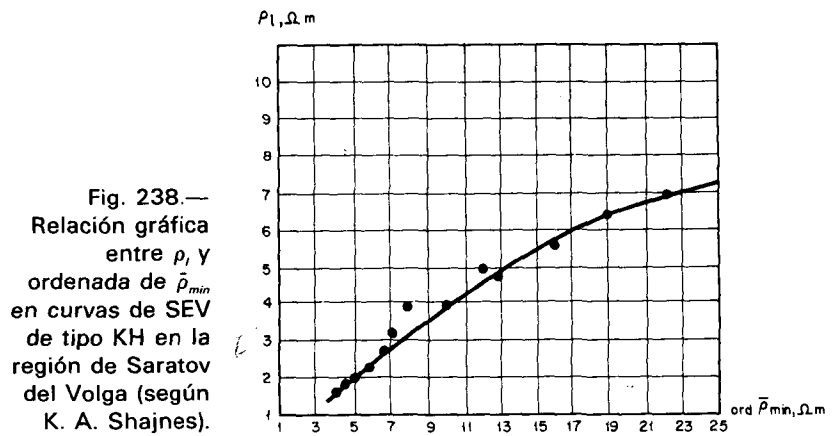


Fig. 238.—
Relación gráfica
entre ρ_1 y
ordenada de $\bar{\rho}_{min}$
en curvas de SEV
de tipo KH en la
región de Saratov
del Volga (según
K. A. Shajnes).

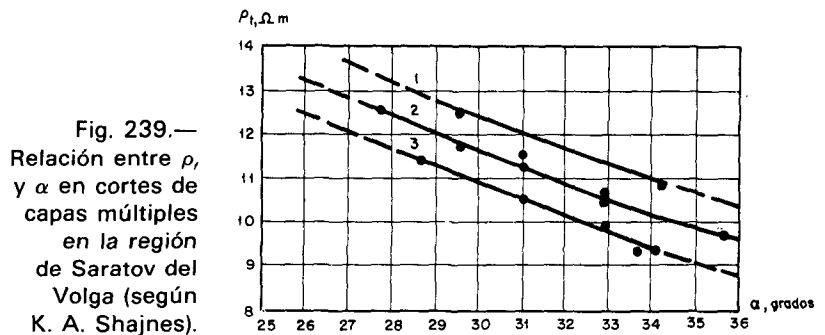
En caso de gran número de datos exactos sobre la profundidad del horizonte de apoyo en puntos de SEV se suelen relacionar los valores ρ_1 obtenidos, con algunas magnitudes características, por ejemplo, S u ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, fáciles de obtener en las curvas de SEV de la región investigada. Con ello se consigue a veces obtener relaciones simples entre estas magnitudes con lo que se simplifica notablemente la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV. En la figura 238 se muestra un gráfico de una de estas relaciones entre ρ_1 y la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$. Se halló con ayuda de una serie de sondeos sísmicos que dieron la profundidad de la superficie del horizonte eléctrico de apoyo en una serie de puntos de SEV. Las curvas son en general de cuatro capas de tipo KH ($\rho_4 = \infty$). Este gráfico permite calcular el valor de ρ_1 en cada punto una vez fijada la magnitud $\bar{\rho}_{min}$ en la correspondiente curva de SEV.

Si en la región estudiada mediante exploración eléctrica existen suficiente número de puntos de SEV en los que son conocidos los valores de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo (para $\rho_4 \neq \infty$) mediante datos de sondeos mecánicos o de exploración sísmica, entonces se puede calcular en esos puntos de SEV el valor ρ_1 y hallar una relación gráfica entre la variación de este parámetro y, por ejemplo, α o L . Tal dependencia fue puesta de manifiesto por primera vez por K. A. Shajnes, en una región en que se presentan cortes eléctricos bastante complejos (de cuatro y cinco capas), generalizando con ello los resultados de la investigación eléctrica efectuada en amplias extensiones de Saratov del Volga.

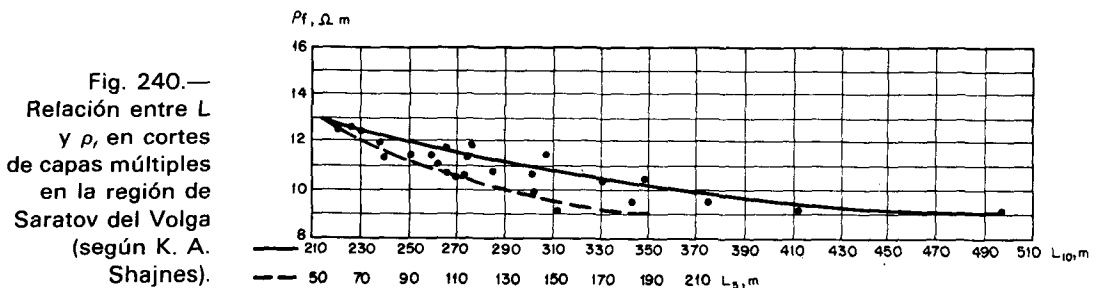
A modo de ejemplo se ha representado en la figura 239 una gráfica de la relación existente entre ρ_1 y α para una de las zonas exploradas, donde en una superficie de unos 700 km² se tienen 15 puntos de SEV en los que se pudo, por los resultados de sondeos mecánicos, estimar la profundidad del horizonte de apoyo de alta resistividad.

La relación entre ρ_1 y α se expresa por las tres curvas en que se aprecia la disminución de ρ_1 al aumentar α . Por consiguiente, a un mismo valor de α pueden corresponder diferentes de ρ_1 . Probablemente, ello está relacionado con la

variación en la zona de los parámetros del corte, fundamentalmente la resistividad del horizonte de apoyo. La cuestión de cuál de las curvas de la gráfica se utiliza para la interpretación cuantitativa de los resultados de SEV en los puntos dados, se soluciona teniendo en cuenta la posición de cada punto de SEV respecto a los puntos en que existen curvas paramétricas de SEV, lo que permitirá elegir la curva de la gráfica que relaciona ρ_r con α . Si, por ejemplo, el punto dado de SEV está próximo a un grupo de puntos de sondeo mecánico que han servido para definir la curva 2 (fig. 239), entonces para la interpretación de la curva dada deberá utilizarse la curva 2 de la gráfica. En el caso en que los puntos correspondientes a las curvas de SEV que se interpretan estén fuera de la zona en que están situados los puntos que han servido para definir las curvas de la gráfica que relaciona ρ_r y α , la elección de la curva conveniente de la gráfica se hará después de un análisis de todo el material de SEV de la región explorada.



En la figura 240 se presenta la relación gráfica entre ρ_r y L . La curva inferior corresponde a valores de L relacionados con la línea $\bar{\rho} = 5 \text{ ohm} \cdot m$ (L_5) y la superior con el valor de L leído en la recta $\bar{\rho} = 10 \text{ ohm} \cdot m$. Por ello se han dispuesto en la figura dos escalas de valores de L . Para la interpretación cuantitativa de las curvas se puede utilizar la curva superior o la inferior. En principio, los resultados de interpretación deben ser iguales.



La cantidad de puntos iniciales con los que se podrían hacer tales gráficas dependerá de la complejidad del corte y grado de variación de sus parámetros dentro del límite de la región explorada. Por la experiencia existente se puede concluir que,

en general, para la solución del problema bastan de 10 a 15 puntos de apoyo para una superficie de 1.000 km². Estos puntos conviene que sean distribuidos por toda la región de un modo regular. Sin embargo, se conocen casos en la práctica en que el cálculo de la resistividad media del corte se obtiene con una cantidad menor de puntos de apoyo.

34. Interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de los tipos KH, QH, HA y AA

Para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de cuatro capas se utilizan normalmente ábacos de curvas de tres capas calculadas u obtenidas gráficamente y los ábacos auxiliares H, A, K y Q.

Veremos los principios generales en que se basa la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas. Como ya hemos indicado, tal proceso de interpretación es, en realidad, el proceso inverso al de la construcción gráfica de las curvas de SEV.

Supondremos siempre que los parámetros ρ_2 y ρ_3 y en algunos casos también ρ_4 son conocidos desde el comienzo de la interpretación cuantitativa. Así como en la construcción gráfica de una curva de SEV de cuatro capas se construye ante todo una curva de tres capas, se examina en primer lugar sólo su parte izquierda, que equivale a una curva de SEV de tres capas de un tipo determinado. Con ayuda del ábaco de dos capas se calculan unos valores previos de h_1 y ρ_1 , a continuación $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y fijamos el ábaco de curvas de SEV calculadas u obtenidas gráficamente correspondiente a este módulo y al valor conocido de ρ_3 y parámetro ν_1 variable. Comparando del modo ya conocido esta parte izquierda de la curva de SEV dada con las curvas del ábaco de tres capas anterior, se calcula ν_1 y, por consiguiente, $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$. A continuación y con ayuda del correspondiente ábaco auxiliar (cuyo tipo se determina por el de la curva de tres capas que forma la parte izquierda de la curva de SEV dada de cuatro capas) y en función de los valores μ_1 y ν_1 obtenidos, se fija en el impreso de SEV la posición del punto cuyas coordenadas expresan el espesor y la resistividad de la capa equivalente al conjunto de las dos primeras del corte. Con ello la curva de SEV de cuatro capas se reduce a una de tres capas. Su interpretación se hace del modo habitual: de los valores conocidos x e y —espesor y resistividad de la primera capa ficticia— se calcula $\mu = \rho_3/y$; se halla para este módulo el ábaco de tres capas correspondiente y en él la curva de SEV que coincide de modo óptimo con la curva de tres capas de la parte derecha de la gráfica dada. Con ello se puede calcular $h_3 = \nu \cdot x$, de donde se deduce la solución al problema de la interpretación: $H = h_1 + h_2 + h_3$.

Dado que normalmente no son suficientes los ábacos de tres capas calculados (especialmente para $\rho_3 \neq \infty$), hay que recurrir a obtenerlos gráficamente para fijar los parámetros que caracterizan al corte eléctrico estudiado. Si no se dispusiera del ábaco necesario para la interpretación de la parte derecha de la curva de cuatro capas dada, dicha parte se

puede interpretar como una curva de tres capas, con ayuda del ábaco auxiliar y del de dos capas.

A veces se construyen ábacos especiales de curvas de cuatro capas con los parámetros del corte usuales en la región investigada para la interpretación de las correspondientes curvas de SEV de cuatro capas.

CURVAS DE SEV DE TIPO KH

Consideremos un ejemplo práctico de interpretación de curvas de SEV de tipo KH (fig. 241). La misma corresponde a un corte en que $\rho_2 = 200$ ohm.m; $\rho_3 = 25$ ohm.m; $\rho_4 = 500$ ohm.m.

Mediante el ábaco de dos capas hallamos $h_1 = 70$ m, $\rho_1 = 50$ ohm.m, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 4$. La parte izquierda de la curva dada es una curva de tres capas de tipo K; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 0,5$.

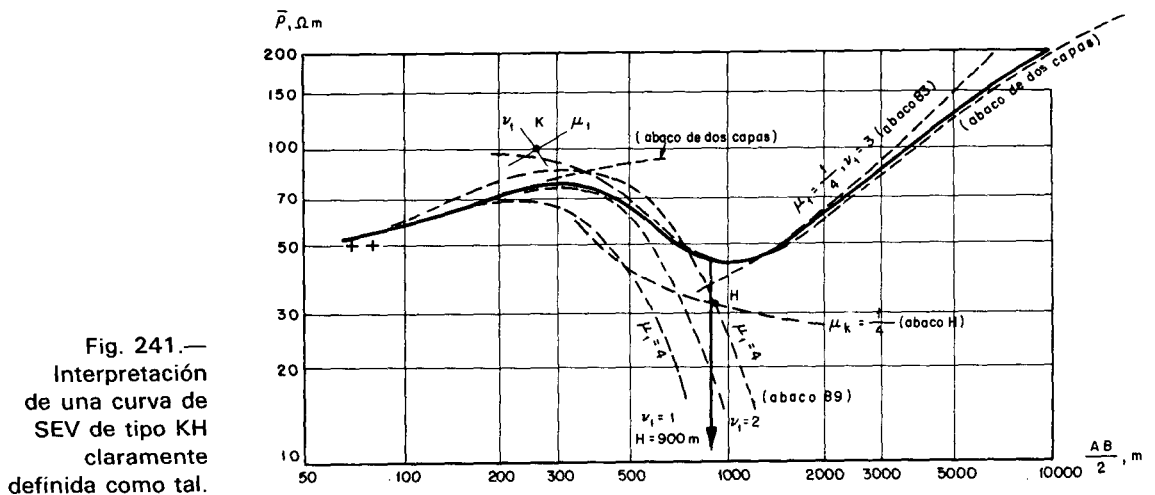


Fig. 241.— Interpretación de una curva de SEV de tipo KH claramente definida como tal.

Por tanto, para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV habría que hacer uso del ábaco de tres capas en que $\mu_1 = 4$ y $\mu_2 = 0,5$. Dado que tal ábaco no está entre los calculados, sería preciso construirlo gráficamente.

Haciendo uso del ábaco calculado para $\mu_1 = 4$ y $\mu_2 = 0$, es evidente que cometemos un error en sentido de exagerar el valor de h_2 . Este ábaco (89) da $\nu_1 = 1,5$. Si tomamos para la interpretación de la curva de SEV el ábaco correspondiente a $\mu_1 = 4$, $\mu_2 = 1$ (59), entonces hallamos un valor de ν_1 menor que el verdadero, entre 0,5 y 1. Tomando la media aritmética de todos estos valores hallamos un valor de ν_1 más probable, que es $\nu_1 = 1$. El ábaco de tres capas da en este caso $h_1 = 80$ m, $\rho_1 = 50$ ohm.m. Por consiguiente, se puede tomar $h_2 = 80$ m.

A continuación, hallamos la posición del punto K:

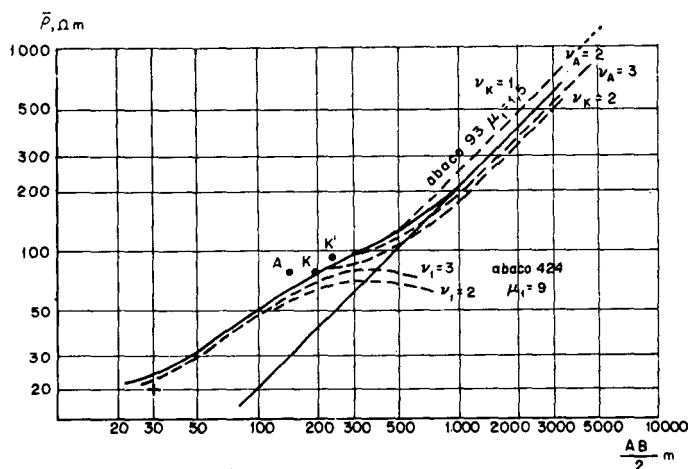
$$x_K = 260 \text{ m}; \quad y_K = 100 \text{ ohm.m.}$$

de donde

$$\mu_k = \frac{\rho_3}{\gamma_k} = 0,25; \quad \frac{\rho_4}{\gamma_k} = 5$$

Para la interpretación de la parte derecha de curva de SEV dada (esta parte es asimilable a una curva de tres capas de tipo H) habría que disponer del ábaco de curvas de SEV de tres capas, correspondiente a las proporciones dadas de las resistividades y ν_1 variable construido gráficamente. Como no se dispone de tal ábaco, utilizamos el ábaco calculado 83 que corresponde a $\mu_1 = 1/4$; $\rho_3 = \infty$. Con ello se comete cierto error en el sentido de obtener un valor de h_3 exagerado. La curva del ábaco que más se acerca a la nuestra es la correspondiente a $\nu_1 = 3$. Por consiguiente, $h_3 = \nu_1 \cdot x_k = 780$ m. Este será el valor máximo posible de h_3 .

Fig. 242.— Interpretación de una curva de SEV de tipo KH mal definida.



A continuación interpretamos la parte derecha de la curva de SEV dada mediante la utilización del ábaco auxiliar H y del ábaco de dos capas. Del ábaco H, cuyo origen de coordenadas se hace coincidir con el punto K, se calca en el impreso de SEV la curva correspondiente a $\mu_1 = 1/4$, fijando la posición del punto H en ella del modo habitual. Obtenemos $x_H = 900$ y de aquí $h_3 = x_H - (h_1 + h_2) = 740$ m. De este modo, suponiendo que $\rho_4 = \infty$, cometemos un error del orden de +5% en la valoración de h_3 . Pero si hacemos uso de las gráficas correspondientes, obtenidas por la investigación de las curvas calculadas de tipo H, entonces se puede asegurar que el error cometido asciende a +13% aproximadamente. Hay que hacer constar también que al interpretar la parte izquierda de la curva de SEV dada, tomando $\rho_3/\rho_1 = 0$ en lugar de $\rho_3/\rho_1 = 0,5$, cometemos un error en la valoración de h_2 de +35%.

Hemos hallado como resultado de la interpretación de la curva de SEV el valor $H = 900$ m. En realidad, la profundidad del horizonte de apoyo en el punto de SEV indicado es de 880 m. Nuestra curva de SEV ha sido interpretada como un error muy pequeño debido al conocimiento exacto de las resistividades paramétricas, a la exactitud en la medición de $\bar{\rho}$ y al aspecto bien definido de la curva. Normalmente, el error de interpretación es bastante mayor, en promedio, de $\pm 15\%$,

incluso en el caso de un cálculo suficientemente exacto de los parámetros.

Consideremos un ejemplo de interpretación de curva de SEV de cuatro capas de tipo KH expresada de modo impreciso, sin máximo ni mínimo de $\bar{\rho}$ (figura 242). Se suponen conocidos $\rho_2 = 180$ ohm.m, $\rho_3 = 120$ ohm.m y como se aprecia en la curva, $\rho_4 = \infty$.

La valoración previa de los parámetros de la primera capa mediante el ábaco de dos capas, da $h_1 = 30$ m; $\rho_1 = 20$ ohm.m; de aquí, $\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 6$. De entre los ábacos de curvas de SEV de tres capas calculadas de tipo K próximos al caso considerado se podría utilizar el ábaco 424 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 3$). Pero ello supone tomar ρ_3 dos veces más pequeño, lo que puede explicar la obtención de un valor de h_2 demasiado exagerado respecto al verdadero. En tal caso es recomendable utilizar ábacos construidos gráficamente de modo expreso para las resistividades paramétricas dadas.

Si utilizamos el ábaco 424 hallamos $\nu_1 = 2$ ó $\nu_1 = 3$ aproximadamente. Suponemos en primera aproximación $\nu_1 = 2$. Mediante el ábaco auxiliar K calculamos

$$x_K = 195 \text{ m}; \quad y_K = 78 \text{ ohm.m.}$$

Entonces

$$\mu_K = \frac{\rho_3}{y_K} = \frac{120}{78} = 1,5$$

La parte derecha de la curva de SEV dada es, según esto, una de tres capas de tipo A. El ábaco 93 ($\mu_1 = 1,5$; $\rho_3 = \infty$) nos da $\nu_K \approx 1,5$. Entonces, $h_3 = \nu_K \cdot x_K = 300$ m y $H = 30 + 60 + 300 = 390$ m.

Si hubiéramos tomado $\nu_1 = 3$, entonces obtendríamos $x'_K = 240$ m, $y'_K = 90$ ohm.m; $\mu'_K = 120/90 = 1,33$.

Utilizando el mismo ábaco 93 se tomaría el valor $\nu'_K = 1,3$. Por el principio de equivalencia, tenemos

$$\nu'_K = \frac{1,3 \cdot 1,33}{1,5} = 1,15$$

De aquí $h'_3 = \nu'_K \cdot x'_K \approx 280$ m y $H = 30 + 90 + 280 = 400$ m. Es decir, que hallamos casi el mismo resultado.

En realidad, el espesor de la tercera capa en el ejemplo citado es de 360 m y la profundidad del horizonte de apoyo de 450 m. El error en el cálculo de h_3 para la primera variante es de un 17% y para la segunda de un 22%. El error en la valoración de la profundidad del horizonte de apoyo es en ambos casos del orden del 13%.

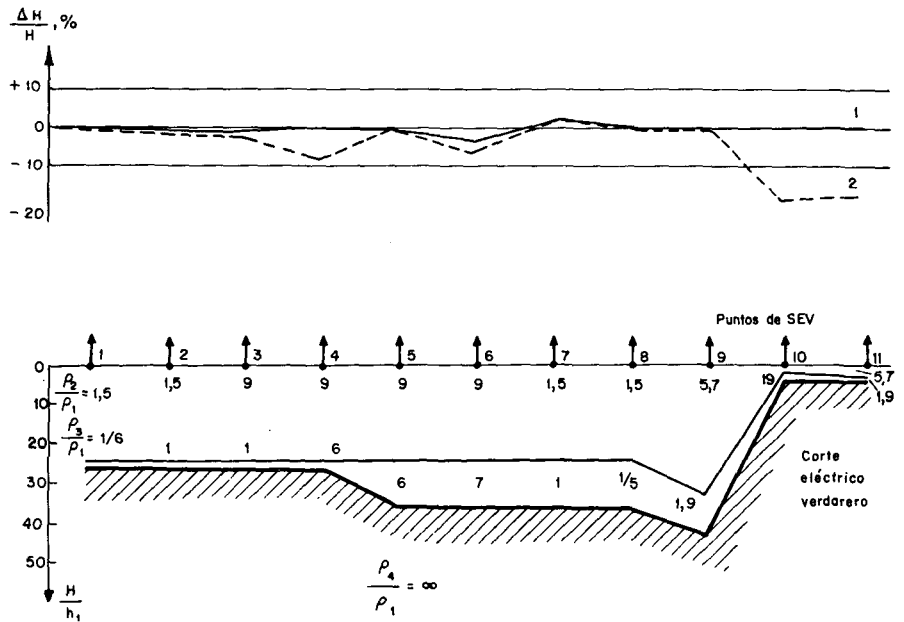
Hay que advertir que para la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas de este aspecto (cuando no se señala bien en ellas el mínimo, pareciendo más bien una curva de

SEV de tipo AA que de tipo KH), se obtienen resultados más exactos haciendo uso del punto A en lugar del K.

Suponiendo que en el ejemplo expuesto $\mu_1 = 9$ y $\nu_2 = 2$, calculamos la posición del punto A (con ayuda del ábaco A):

$$x_A = 140 \text{ m}; \quad y_A = 78 \text{ ohm.m}; \quad \mu_A = 1,5$$

Fig. 243.—Errores de interpretación en curvas de cuatro capas de tipo KH ($\rho_4 = \infty$) con utilización de los puntos K y A.
 1.—Interpretación mediante el punto A;
 2.—Interpretación mediante el punto K.
 Carácter de las curvas de SEV: En los puntos de SEV 1, 2, 3, 4, 5, 10 no hay mínimo; en los puntos de SEV 6, 7, 9, 11 el mínimo está mal definido; en el punto de SEV 8 el mínimo está bien definido.



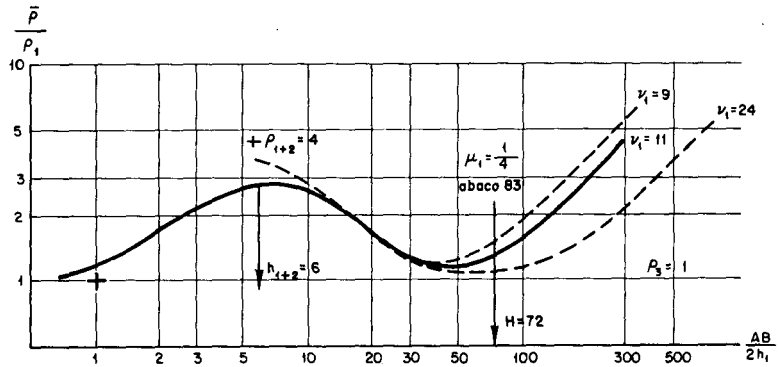
Utilizando el mismo ábaco 93 tendremos

$\nu_A = 2,5$; $h_3 = \nu_A \cdot x_A = 350 \text{ m}$; $H = 440 \text{ m}$. Los errores en el cálculo de h_3 y H son en este caso del orden del 3 y 2%. En la figura 243 se representa un gráfico de los errores de interpretación de curvas teóricas de SEV de tipo KH con mínimo de $\bar{\rho}$ mal expresado. La interpretación se ha realizado con ayuda de los puntos K y A. Como vemos, el error menor en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo se obtiene utilizando el punto A.

Si la curva de SEV de cuatro capas de tipo KH queda bien definida como tal y corresponde a un corte en el que el espesor de la capa conductora (h_3) es grande en comparación con h_1 y h_2 entonces se puede, sin gran error, despreciar su parte izquierda para la interpretación, estudiando sólo la derecha. En efecto, sea por ejemplo la curva de SEV correspondiente al corte en que $h_1 = 1$, $h_2 = 2$, $h_3 = 72$; $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 9$, $\rho_3 = 1$; $h_4 = \infty$; $\rho_4 = \infty$ (fig. 244). Despreciando la parte izquierda de la curva interpretamos su parte derecha como una curva de tres capas de tipo H. En la colección de ábacos calculados la mejor coincidencia de esta curva de SEV se logra con las curvas del ábaco 83 ($\mu_1 = 1/4$, $\rho_4 = \infty$). Mediante interpolación encontramos que la coincidencia óptima con la curva que se interpreta, la da la curva del

ábaco con $\nu_1 = 11$. Designando el espesor de la primera capa (que corresponderá al conjunto de las dos capas superiores del corte) por h_{1+2} , tenemos $h_{1+2} = 6$; entonces $h_3 = \nu_1 \cdot h_{1+2} = 66$ y $H = h_{1+2} + h_3 = 72$. El error de interpretación asciende en total a un 4%.

Fig. 244.— Interpretación de una curva de SEV de tipo KH con ayuda de los ábacos de tres capas.



Aproximadamente, el mismo error se comete en la interpretación de la curva de SEV con ayuda del ábaco de dos capas, si se supone ρ_1 igual a $\rho_3 = 1$.

Por consiguiente, vemos en el ejemplo considerado de corte de cuatro capas de tipo KH, que se puede hallar de un modo suficientemente exacto la profundidad del horizonte de apoyo, interpretando la parte derecha de la curva con ayuda de los ábacos de tres y dos capas.

Hay que hacer constar que en el caso de curvas de SEV con un mínimo amplio no es necesario conocer de antemano para la interpretación las resistividades paramétricas. El principio de equivalencia se extiende en este caso entre límites muy estrechos y se puede hallar en la colección de ábacos sólo una curva de tres capas que coincida de modo aceptable con la que se interpreta. Utilizando asimismo el ábaco de dos capas podemos suponer, sin introducir errores de consideración, $\rho_1 = \bar{\rho}_{min}$ de la curva.

El análisis de las curvas de SEV calculadas de tipo KH permite concluir que este método de interpretación, con la condición de que el error $\Delta H/H$ no sea mayor de $\pm 10\%$, es factible si $h_2/h_1 \leq 5$ y $h_3/h_2 \geq 10$. En este caso, ρ_2/ρ_1 puede variar entre 1,5 y 9 y ρ_3/ρ_2 entre 1/9 y 2/3. Estas conclusiones no pueden ser exhaustivas, ya que se han obtenido en función de un número de curvas de SEV calculadas no demasiado grande.

Para determinadas relaciones entre los parámetros espesor y resistividad del corte, y carácter de las curvas de SEV de tipo KH claramente expresado, también es posible interpretar las mismas dentro del margen admisible de error (hasta $\pm 10\%$) despreciando su parte izquierda, aún en caso de que h_3 no sea muy grande en comparación con h_2 . Sin embargo, para ello hay que conocer los parámetros ρ_3 y ρ_4 . El análisis demuestra que cuanto menor sea ρ_2/ρ_1 , tanto menor podrán

ser las relaciones h_2/h_1 y h_3/h_1 para poder utilizar el método citado de interpretación simplificada. En la tabla 47 se dan algunos valores de las relaciones h_2/h_1 y h_3/h_2 para los que, para ρ_2/ρ_1 dados y diferentes ρ_3/ρ_1 ($\rho_4 = \infty$), es posible la aplicación de dicho método simplificado. Para valores grandes de h_2/h_1 y h_3/h_2 el mismo puede ser utilizado con toda seguridad. La interpretación de cualquier curva de SEV de cuatro capas se facilita en gran medida si $\rho_4 = \infty$. En dicho caso, se puede obtener de la curva el valor de la conductancia longitudinal total $S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + h_3/\rho_3$, y conociendo h_1 , ρ_1 y h_2 por el resultado de la interpretación de la parte izquierda de la curva, calcular, conocidos ρ_2 y ρ_3 , el valor $h_3 = (S - h_1/\rho_1 - h_2/\rho_2)$. Así, por ejemplo, para la curva de SEV citada en la figura 242 tendremos

$$S = 4,8 = 30/20 + 60/180 + h_3/120$$

de donde

$$h_3 = (4,8 - 1,83) \cdot 120 \approx 360 \text{ m}$$

Si en la región que se investiga, en la que $\rho_4 = \infty$, se puede calcular el valor ρ_i de la resistividad media longitudinal del corte en cada uno de los puntos de SEV, entonces la profundidad del horizonte de apoyo es fácil calcularla en cada uno de ellos mediante la fórmula conocida $H = \rho_i \cdot S$.

TABLA 47

RELACIONES MINIMAS ENTRE LOS PARAMETROS DE LAS CAPAS EN EL CORTE DE TIPO KH ($\rho_4 = \infty$), QUE PERMITEN DESPRECIAR LA PARTE IZQUIERDA DE LAS CURVAS DE SEV A EFECTOS DE SU INTERPRETACION

ρ_2/ρ_1	h_2/h_1	h_3/h_2
1,5	1	1
3	3	3,5
5,7	3	3,5
9	2	6
19	5	10

Errores de interpretación en función del error en la valoración de S

La suposición de un error en el cálculo de S entraña otro en el resultado de la interpretación de la curva de SEV ($\rho_4 = \infty$). La práctica indica que el error en la evaluación de S obtenido de la curva de SEV puede llegar a $\pm(5 \text{ a } 10\%)$.

Veamos cómo influye el error en el cálculo de S en el resultado de la interpretación. Designamos dicho error, como en el caso del estudio del corte de tres capas, por $L\%$ y el coeficiente de error por $q = 1 + L/100$.

Suponiendo que todos los parámetros iniciales han sido calculados exactamente, es fácil ver que ese error de valoración sólo influye en el cálculo de h_3 . Sea h'_3 el valor erróneo de h_3 .

Entonces

$$qS = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h'_3}{\rho_3}$$

de donde

$$h'_3 = \rho_3 (q-1) \left(\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \right) + qh_3$$

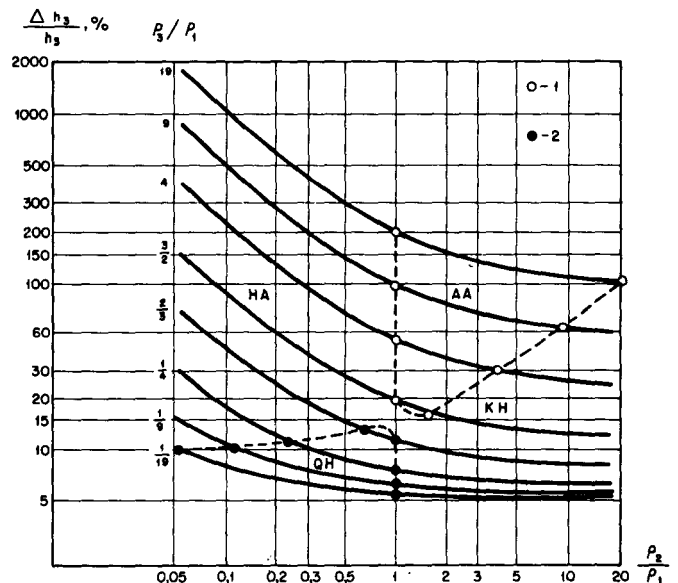
y

$$\Delta H = \Delta h_3 = h'_3 - h_3 = (q-1) \left[\rho_3 \left(\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \right) + h_3 \right] \quad (61)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{L[\rho_3(h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2) + h_3]}{H} \% \quad (62)$$

El error de interpretación tiene el mismo signo que el error en el cálculo de S. Este error aumenta al crecer ρ_3 . La gráfica del error $\Delta h_3/h_3$ (fig. 245) construida según la fórmula (62), sustituyendo H por h_3 , para valores variables de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 y fijos $h_2/h_1 = h_3/h_1 = 1$, en el supuesto de que el error en la evaluación de S es de +5%, demuestra que se presentan errores particularmente elevados en el cálculo de h_3 en relación con el error en la valoración de S, en la interpretación de las curvas de SEV de los tipos HA y AA y mínimos en la interpretación de las curvas de SEV de los tipos QH y KH.

Fig. 245.—
Errores en el cálculo del espesor de la capa h_3 en la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas de diversos tipos ($\rho_4 = \infty$), para error en la variación de S igual a +5%.
 $h_1 = h_2 = h_3 = 1$;
 $\rho_1 = 1$.
1.—Curvas de SEV de los tipos HA y AA;
2.—Curvas de SEV de los tipos KH y QH.



Errores de interpretación motivados por los errores en la valoración de h_1 y ρ_1

La existencia de error en la valoración de h_1 y ρ_1 en la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas, evidentemente provoca error en el cálculo de h_2 y h_3 .

1. El error absoluto ΔH depende de h_1 , del error en la valoración de h_1 y ρ_1 y relación de resistividades de las capas. Con las restantes condiciones iguales, el error aumenta al crecer ρ_2 y ρ_3 .
2. El signo del error de interpretación es normalmente igual al del error en la valoración de ρ_1 .
3. Para errores en el sentido de aumentar h_1 y ρ_1 , el error en la evaluación de H también tiene signo positivo, aunque de escasa importancia en comparación con h_1 . Por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 4$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$, un error en la evaluación de h_1 y ρ_1 entre $+200$ y $+60\%$ ocasiona en H un error igual a $0,4 h_1$; al aumentar ρ_2/ρ_1 hasta 9 , permaneciendo iguales las demás condiciones, el error aumenta hasta $0,75 h_1$.
4. En caso de valor de h_1 exagerado y de ρ_1 disminuido, el error de interpretación origina una disminución en el valor de la profundidad H al horizonte de apoyo y crece al aumentar los valores absolutos de estos errores. Así, por ejemplo, para $\rho_2/\rho_1 = 9$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$, errores en la valoración de h_1 y ρ_1 de $+100$ y -30% , respectivamente, causan un error de interpretación $\Delta H \approx -h_1$. Si con las mismas condiciones los errores crecen a $+200$ y -60% , entonces el error aumenta hasta $\Delta H = -4,5 h_1$.
5. Al disminuir h_2 , con $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} \%$ positivo, se tiene un error relativo pequeño en la interpretación y en el sentido de exagerar el valor de H (por ejemplo, para el caso anterior y errores en la valoración de h_1 y ρ_1 variando entre -30% y $+100\%$, el error de interpretación es $\Delta H = 0,3 h_1$) y para $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} \%$ negativo, se tiene un error más grande de signo negativo (si, por ejemplo, para esos mismos parámetros el error en el cálculo de h_1 y ρ_1 varía entre -30 y -60% , el error de interpretación es $\Delta H \approx -0,9 h_1$).
6. Para valores dados de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 hay cierto valor del error $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} \%$ para el que cualquier error en la valoración de h_1 lleva consigo el mismo error de interpretación $\Delta H/H$. Por ejemplo, si $\rho_2/\rho_1 = 4$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$, entonces para un error en la valoración de ρ_1 del orden de $+35\%$, se puede suponer cualquier error en la valoración de h_1 , que provocará prácticamente el mismo error de interpretación ΔH de $0,2$ a $0,3 h_1$; si $\rho_2/\rho_1 = 9$ y $\rho_3/\rho_1 = 1$, entonces un error en la valoración de ρ_1 del orden de $+13\%$ supondrá cualquier error en el cálculo de h_1 y para éste el error de H será constantemente del orden de $0,1 h_1$ y así sucesivamente.

En la figura 246 se dan las gráficas del error de interpretación ($\Delta H/h_1$) en las curvas de SEV de tipo KH

($\rho_4 = \infty$) en función de los errores en la determinación de h_1 y ρ_1 , de -60 a $+200\%$, para valores de los parámetros del corte $\rho_2/\rho_1 = 9$, $\rho_3/\rho_1 = 1$. Estas gráficas ilustran hasta cierto punto las conclusiones anteriores. Hay que advertir que para dichas gráficas como en otros casos análogos, se ha partido de la fórmula

$$\frac{\Delta H}{h_1} = \frac{\rho_3}{K_2 \rho_1} (K_2 - K_1) + \frac{\rho_1}{\rho_2} (K_1 K_2 - 1) \left(\frac{\rho_3}{\rho_1} - 1 \right) + (K_1 - 1) \quad (63)$$

En ella, la nomenclatura es la misma que se utilizó en el caso del estudio del corte de tres capas.

El error relativo en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo en función de los errores de h_1 y ρ_1 , se expresa por

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{\frac{\rho_3}{K_2 \rho_1} (n-m) + \frac{\rho_1}{\rho_2} (m+n+0,01 mn) \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} - 1 \right) + m}{1 + \frac{h_2}{h_1} + \frac{h_3}{h_1}} \% \quad (64)$$

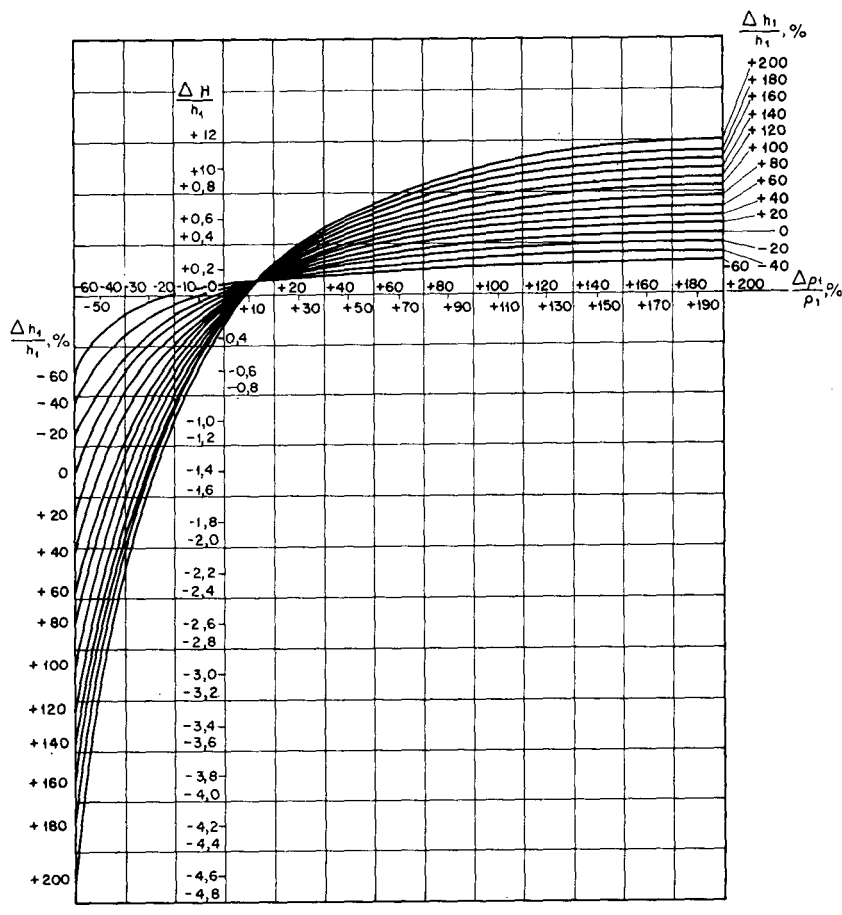


Fig. 246.—Errores de interpretación de curvas de SEV de tipo KH para $\rho_2/\rho_1 = 9$; $\rho_3/\rho_1 = 1$; $\rho_4 = \infty$ en función de los errores en el cálculo de h_1 y ρ_1 .

La fórmula (64) sólo es válida para curvas de SEV de tipo KH. Una expresión análoga se puede hallar para cada una de las curvas de cuatro capas de los otros tipos. Sin embargo, el espesor h_1 en los cortes de cuatro capas es normalmente pequeño en comparación con la profundidad del horizonte de apoyo por lo que el error en la valoración de h_1 y ρ_1 no suele influir de modo considerable en los resultados de la interpretación. Por ello no veremos estas otras expresiones.

Errores de interpretación motivados por la valoración inexacta de ρ_2 , ρ_3 y ρ_4

Supongamos que fijando de modo exacto todos los parámetros iniciales del corte admitimos, en la interpretación de las curvas de SEV de tipo KH ($\rho_4 = \infty$), un error en la valoración de ρ_2 . Sea el error $\Delta \rho_2 / \rho_2$, $\rho\%$ con cualquier signo. Entonces, el valor erróneo de la resistividad será $\rho'_2 = K_3 \cdot \rho_2$, siendo $K_3 = 1 + \rho / 100$. El error en la evaluación de ρ_2 lleva consigo un error en el cálculo de h_2 y h_3 , y tendremos

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} = \frac{h'_1}{\rho_1} + \frac{h'_2}{K_3 \rho_2} + \frac{h'_3}{\rho_3}$$

El valor erróneo calculado h'_2 para las curvas de SEV de tres capas de tipo K y el error de interpretación se expresan, como sabemos, por:

$$h'_2 = \frac{h_2}{K_3}; \Delta h_2 = h'_2 - h_2 = \frac{h_2}{K_3} (1 - K_3);$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} 100 = -\frac{1}{K_3} \rho\%$$

Sustituyendo la primera expresión por la fórmula anterior, hallamos la expresión del error absoluto y relativo en la determinación del espesor de la tercera capa:

$$\Delta h_3 = h'_3 - h_3 = \frac{h_2 \rho_3}{K_3^2 \rho_2} (K_3^2 - 1) \quad (65)$$

$$\frac{\Delta h_3}{H_3} 100 = \frac{h_2}{h_3} \cdot \frac{\rho_3}{K_3^2 \rho_2} \rho (K_3 + 1)\% \quad (66)$$

El error absoluto y relativo en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo serán

$$\Delta H = \Delta h_2 + \Delta h_3 = \frac{h_2}{K_3} (K_3 - 1) \left[\frac{\rho_3}{\rho_2} \left(1 + \frac{1}{K_3} \right) - 1 \right] \quad (67)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{(h_2 / K_3) \rho [\rho_3 / \rho_2 (1 + 1 / K_3) - 1]}{H} \% \quad (68)$$

En las proporciones obtenidas se observa:

1. El error en el cálculo del espesor de la capa h_3 , dependiente del error en la valoración de ρ_2 , aumenta al aumentar h_2 y tiene el mismo signo que el citado error en la valoración de ρ_2 ; dado que el error en el cálculo del espesor h_2 tiene signo opuesto que el error en la valoración de ρ_2 , ambos errores no se acumulan sino que se restan uno del otro.
2. El error absoluto en el cálculo de la profundidad H del horizonte de apoyo aumenta al aumentar h_2 y ρ_3 / ρ_2 . Puede tener el mismo signo que el error de ρ_2 o contrario, según sea mayor o menor que la unidad la suma $\rho_3 / \rho_2 + \rho_3 / K_3 \rho_2$.

Si en la interpretación de la curva de SEV de tipo KH sólo se introduce error en la valoración del parámetro ρ_3 , entonces sólo se tiene un error de importancia en el cálculo del espesor h_3 .

Designando por $f\%$ el error relativo en la valoración de ρ_3 y el coeficiente de error por $K_4 = 1 + f/100$, tendremos

$$\Delta H = \Delta h_3 = h_3 (K_4 - 1) \quad (69)$$

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = f\% \quad (70)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{h_3 f}{H} \% \quad (71)$$

Para llegar a esta conclusión no se tienen en cuenta los errores comparativamente pequeños que introducimos en la valoración de h_2 al interpretar la parte izquierda de la curva de SEV con error en la determinación de ρ_3 . Este error es difícil de expresar analíticamente. Trataremos sobre él más adelante.

Es fácil deducir que en el supuesto de error simultáneo en la valoración de ambos parámetros ρ_2 y ρ_3 los errores de interpretación se expresan por:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left(\frac{h_2}{h_3} \frac{K_4 \rho_3}{K_3^2 \rho_2} \rho (K_3 + 1) + f \right) \% \quad (72)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{(h_2/K_2) \rho [K_4 \rho_3 / K_3 \rho_2 (K_3 + 1) - 1] + h_3 f}{H} \% \quad (73)$$

Si en las ecuaciones anteriores se hace $f=0$ (y, por consiguiente, $K_4=1$), ello equivale a suponer que en la interpretación tan sólo es erróneo el valor de ρ_2 , volviéndose a tener las fórmulas (66) y (68). De modo análogo si suponemos $\rho_3 = \rho_2$, ya que entonces el corte dado de cuatro capas queda reducido a un corte de tres capas de tipo A, teniéndose que la fórmula (73) se reduce a la fórmula (37).

Las citadas expresiones del error de interpretación en función del error en las valoraciones de h_1 , ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 sirve para el caso de $\rho_4 = \infty$. Sin embargo, como se ha podido comprobar, las mismas sirven con un grado variable de aproximación para el caso de $\rho_4 \neq \infty$.

En el caso más general, cuando en la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas de tipo KH ($\rho_4 = \infty$) se introducen errores en la valoración de S , ρ_2 y ρ_3 , se puede hallar exactamente, lo mismo que en los casos anteriores, la fórmula del error cometido en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo:

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{K_4 \rho_3 \left\{ L \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2 K_3^2} [\rho q (K_3 + 1) + L] \right\} + h_3 (f + L + 0,01 fL) - \frac{h_2}{K_3} \rho}{H} \quad (74)$$

Utilizando esta fórmula es fácil calcular el error total de interpretación, conocidos los errores en la valoración de cada uno de los parámetros iniciales, S , ρ_2 y ρ_3 .

Para el cálculo del error de interpretación en las curvas de SEV de cuatro capas de tipo KH ($\rho_4 \neq \infty$), en caso de error en la valoración de la resistividad ρ_4 , se puede utilizar la gráfica de error citada para el caso de curva de tres capas de tipo H (fig. 148). Conocido el error en la valoración de ρ_4 es fácil calcular el error cometido en el proceso de interpretación de la parte derecha de la curva de SEV de cuatro capas mediante igualdades

$$\mu_K = \frac{\rho_3}{\gamma_K}, \quad \nu_K = \frac{h_3}{x_K},$$

en que x_K e γ_K son las coordenadas del punto K definido por el espesor y la resistividad de la capa equivalente a las dos primeras capas del corte dado de cuatro capas de tipo KH.

Errores de interpretación de las curvas de SEV ($\rho_4 \neq \infty$) al interpretarlas como de tres o de dos capas

En los cortes de tipo KH, así como en los de los restantes tipos de cortes de tres o cuatro capas, para el caso de resistividad elevada del horizonte de apoyo, la segunda o tercera capa (o el conjunto de ambas) pueden tener un espesor relativamente tan pequeño o una resistividad tan escasamente distinta de la de las capas adyacentes que dichas capas no se reflejan claramente en la curva de SEV y en la interpretación se considera ésta como de tres o incluso de dos capas. Se ha comprobado que en estos casos el resultado de la interpretación puede ser erróneo e incluso de gran consideración el error cometido. Hallaremos la expresión general de este error.

La profundidad del horizonte de apoyo en el corte de cuatro capas viene dada por $H = h_1 + h_2 + h_3$. Si al interpretar la curva de SEV no se considera la capa h_2 , ρ_2 que no se manifiesta de modo claro en la misma, entonces se obtendrá un valor erróneo de la profundidad, $H' = h_1 + h'_3$, siendo h'_3 el espesor de la capa tercera supuesta.

Al interpretar la curva de SEV de cuatro capas ($\rho_4 = \infty$) como de tres capas, hallamos h'_3 como de costumbre mediante la fórmula

$$h'_3 = (S - S_1) \rho_3 = h_2 \frac{\rho_3}{\rho_2} + h_3$$

Entonces

$$\Delta H = h_2 \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} - 1 \right) * \quad (75)$$

* Es fácil comprobar que en caso de $\rho_4 = 0$ (curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ y QQ) esta expresión da el error cometido al interpretar la curva de SEV de uno de los tipos indicados como si fuera de tres capas, menospreciando h_3 , ρ_3 .

El error, como vemos, crece al aumentar h_2 . Para $\rho_3/\rho_2 > 1$ tiene signo positivo; para $\rho_3/\rho_2 < 1$, negativo. De esto se deduce que al interpretar las curvas de SEV de cuatro capas de los tipos HA y AA ($\rho_3 > \rho_2$) confusamente expresadas, el desprecio de la capa h_2 , origina una exageración en el valor de la profundidad del horizonte de apoyo y en el caso de las curvas de los tipos KH y QH un descenso de ella. En el primer caso, el valor absoluto del error crece de forma ilimitada al aumentar ρ_3/ρ_2 y en el segundo la magnitud absoluta del error crece sólo hasta un límite igual a h_2 al disminuir ρ_3/ρ_2 .

Igualmente puede hallarse la expresión del error que se produce al interpretar las curvas de cuatro capas de SEV como de tres capas, cuando en ellas es la tercera capa la que no está claramente definida:

$$H = h_3 \left(\frac{\rho_2}{\rho_3} - 1 \right)^* \quad (76)$$

En este caso, el error crece al aumentar h_3 . Tiene signo positivo para $\rho_2 > \rho_3$ (curvas de SEV de los tipos KH y QH) y negativo para $\rho_2 < \rho_3$ (curvas de SEV de los tipos HA y AA). La magnitud absoluta del error de interpretación de las curvas de SEV de los tipos KH y QH crece de modo ilimitado al aumentar ρ_2/ρ_3 y para las curvas de SEV de los tipos HA y AA crece al disminuir ρ_2/ρ_3 llegando en el límite al valor h_3 .

Es fácil hallar la expresión del error de interpretación en el caso de curvas de cuatro capas de SEV, cuando están mal definidas sus capas h_2 , ρ_2 y h_3 , ρ_3 y se considera como de dos capas. En este caso tendremos

$$h'_1 = S \rho_1 = h_1 + \frac{h_2 \rho_1}{\rho_2} + \frac{h_3 \rho_1}{\rho_3}$$

$$\Delta H = h'_1 - H = h_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) + h_3 \left(\frac{\rho_1}{\rho_3} - 1 \right)^{**} \quad (77)$$

Evidentemente, para las curvas de tipo QH el error tendrá siempre signo positivo ($\rho_1/\rho_2 > 1$; $\rho_1/\rho_3 > 1$) y para las curvas de tipo AA, negativo ($\rho_1/\rho_2 < 1$; $\rho_1/\rho_3 < 1$). La interpretación de las curvas de SEV de tipo KH como de dos capas conduce a la disminución del valor de la profundidad, si $\rho_3 > \rho_1$ y a su disminución o aumento si $\rho_3 < \rho_1$; para las curvas de SEV de tipo HA el error será positivo para $\rho_3 > \rho_1$ y positivo o negativo para $\rho_3 < \rho_2$.

Veamos un ejemplo. Sea la curva de SEV que refleja un corte de cuatro capas de tipos KH en que $h_1 = 100$ m, $h_2 = 100$ m,

* Para las curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ y QQ ($\rho_4 = 0$) la fórmula expresa el error de interpretación de dichas curvas como de tres capas al menospreciar la capa h_2 , ρ_2 .

** En caso de $\rho_4 = 0$ (curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ y QQ) la fórmula (77) pasa a ser

$$\Delta H = h_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) + h_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} - 1 \right) \quad (77')$$

$h_3 = 100$ m, $h_4 = \infty$; $\rho_1 = 20$ ohm.m, $\rho_2 = 800$ ohm.m, $\rho_4 = \infty$ (fig. 247 a). Se puede tomar tal curva perfectamente como de dos capas. Interpretándola así hallamos $\rho_1 = 20$ ohm.m; $H = 110$ m. El error de interpretación es $\Delta H = -190$ m; $(\Delta H/H) 100 \approx -60\%$. El cálculo por la fórmula (77) da

$$\Delta H = 100 \left(\frac{20}{800} - 1 \right) + 100 \left(\frac{20}{200} - 1 \right) = -185 \text{ m}; \frac{\Delta H}{H} 100 \approx -60\%$$

El error de interpretación es muy elevado. En este caso de interpretación de la curva como si fuera de dos capas, se señala la profundidad no al horizonte de apoyo, sino a la segunda capa de resistividad elevada.

Si la curva de SEV dada se interpreta como de tres capas despreciando la capa h_3 , ρ_3 entonces se cometerá un error aún mayor, pero de signo distinto. En efecto, por la fórmula (76) tenemos

$$\Delta H = 100 \left(\frac{800}{200} - 1 \right) = 300 \text{ m}; \frac{\Delta H}{H} 100 \approx +100\%$$

La profundidad del horizonte de apoyo aparece muy aumentada.

En algunos casos de corte de cuatro capas reflejado por una curva de SEV en la que no se expresan claramente las capas h_2 y h_3 se puede tener un resultado más cercano a la realidad estudiando la curva no como de tres capas, sino como de dos.

Ello se puede ver con el siguiente ejemplo. La curva de SEV de la figura 247 b correspondiente a un corte de cuatro capas de tipo HA ($\rho_4 = \infty$) con los mismos espesores paramétricos que en el caso anterior ($h_1 = h_2 = h_3 = 100$ m), pero con $\rho_1 = 30$ ohm.m, $\rho_2 = 20$ ohm.m, $\rho_3 = 270$ ohm.m. En su interpretación como de dos capas tenemos $H = 260$ m; el

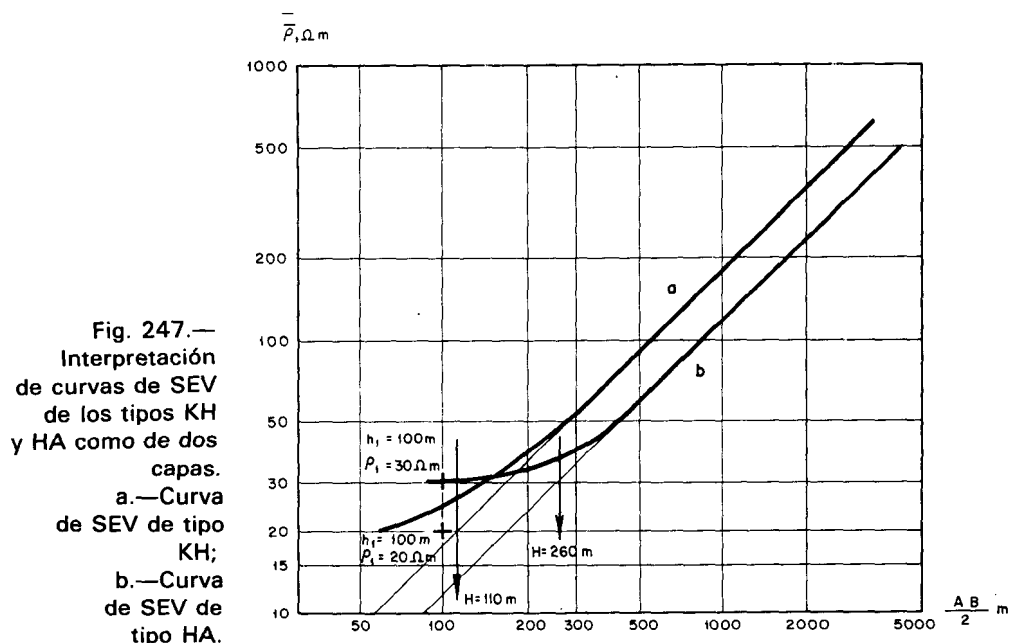


Fig. 247.— Interpretación de curvas de SEV de los tipos KH y HA como de dos capas.
a.—Curva de SEV de tipo KH;
b.—Curva de SEV de tipo HA.

error es $\Delta H = 40$ m; $(\Delta H/H) \cdot 100 \approx -13\%$. Si consideramos dicha curva de SEV como de tres capas, despreciando la capa h_2, ρ_2 , hallamos $S = 8,7$; $S_3 = S - S_1 = 5,4$; $h'_3 = S_3 \rho_3 = 1.460$ m, $H = 1.560$ m; $\Delta H \approx 1.260$ m; $(\Delta H/H) \cdot 100 \approx 420\%$. Si en la interpretación despreciamos también la capa h_3, ρ_3 , entonces $h_2 = S_2 \cdot \rho_2 = 108$ m; $H = 208$ m; $\Delta H \approx -90$ m; $(\Delta H/H) \cdot 100 \approx -30\%$.

El error menor se tiene, como vemos, al interpretar la curva de SEV dada de cuatro capas, como si fuera de dos. Se llega a resultados totalmente insatisfactorios al interpretar la curva como de tres capas con menosprecio de la capa conductora h_2, ρ_2 .

CURVAS DE SEV DE TIPO QH

Veamos un ejemplo de interpretación de curva de SEV de cuatro capas de este tipo (fig. 248 a). Se sabe que $\rho_2 = 20$ ohm.m, $\rho_3 = 5,5$ ohm.m. Se ve que en la curva dada de SEV es $\rho_4 = \infty$.

Con ayuda del ábaco de dos capas se calcula $h_1 = 30$ m, $\rho_1 = 60$ ohm.m. De aquí, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1/3$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 \approx 1/11$. Llevamos del ábaco auxiliar Q al impreso de campo la curva $\mu_1 = 1/3$. El punto Q cuyas coordenadas expresan el espesor y la resistividad de la capa equivalente a los dos niveles superiores debe estar situado en dicha curva. Para fijar exactamente la posición del punto Q hay que recurrir al ábaco de curvas de tres capas de tipo H en que $\rho_3 = \infty$. ¿Qué valor de μ_1 habrá que tomar (en nuestro caso es μ_0) en el ábaco? La pendiente suave de la rama descendente de la curva indica que h_2 es bastante grande en comparación con h_1 , y que el valor y_0 puede estar próximo a 20 ohm.m. En este caso, $\mu_0 = \rho_3/y_0 = 1/4$ (ábaco 83).

Llevando nuestra curva de SEV al ábaco 83 de modo que el origen del ábaco se desplace por la curva del ábaco Q, $\mu_1 = 1/3$ trazada anteriormente, permaneciendo los ejes coordenados del ábaco e impreso rigurosamente paralelos entre sí, hallamos, mediante interpolación, que la coincidencia óptima de la parte derecha de la curva de SEV se tiene para ν_1 (en nuestro caso, ν_0) igual a $h_3/x_0 = 1,2$; para este valor, ρ_2 es igual a 5 ohm.m. El origen de coordenadas del ábaco nos da la posición del punto Q:

$$x_0 = 200 \text{ m}; \quad y_0 = 20 \text{ ohm.m}$$

De aquí se tiene $h_3 = 1,2 \cdot x_0 = 240$ m. Pero la resistividad verdadera de la tercera capa es 5,5 ohm.m. Teniendo en cuenta que en el corte considerado de tipo H se puede aplicar el principio de equivalencia (fig. 71), hallamos mediante el correspondiente cálculo el valor corregido

$$h_3 = \frac{240 \cdot 5,5}{5} \approx 265 \text{ m}$$

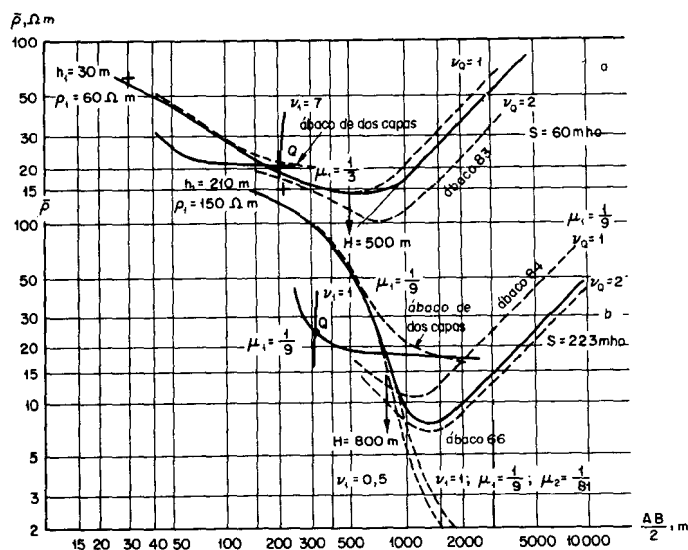


Fig. 248.— Interpretación de curvas de SEV de tipo QH.

Para calcular h_2 superponemos de nuevo la curva de SEV dada con el ábaco auxiliar Q, haciendo coincidir el origen de coordenadas de éste con el punto $h_1 = 30$ m, $\rho_1 = 60$ ohm.m. Tenemos que por el punto Q obtenido pasa la curva del ábaco $\nu_1 = h_2/h_1 = 7$ (fig. 248 a). De aquí $h_2 = 30 \cdot 7 = 210$ m.

Por consiguiente, la profundidad del horizonte de apoyo será:

$$H = 30 + 210 + 265 \approx 500 \text{ m}$$

Las curvas de SEV de tipo QH se interpretan también del siguiente modo. Prescindiendo de la rama final ascendente se considera tan sólo la parte izquierda de la gráfica que es una curva de SEV de tipo Q (supuesto $h_3 = \infty$). En nuestro caso, $\mu_1 = 1/3$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 \approx 1/11$. Dado que en la colección no existe el ábaco de curvas de SEV de tres capas correspondiente a estos módulos, se construirá gráficamente. A continuación, comparando la rama izquierda de la curva dada con el ábaco construido, se fija $\nu_1 = h_2/h_1$ y de aquí deducir h_2 . Esto permite, con ayuda del ábaco Q, hallar a continuación la posición del punto Q. En cuanto a la parte derecha de la curva de SEV dada se interpreta del modo expuesto anteriormente. Si al superponer la curva de SEV en el ábaco de tres capas de tipo H queda el punto Q algo desplazado de su posición hallada anteriormente, se toma como definitiva la posición obtenida en último lugar. Entonces, el valor corregido de h_2 se calcula con ayuda del ábaco Q como se ha indicado anteriormente.

El problema de la interpretación de la curva de SEV dada podría solucionarse de un modo algo más sencillo teniendo en cuenta que $\rho_4 = \infty$. En efecto, sacando de la curva $S = 60$ mho y calculando, como indicamos anteriormente, h_1 , ρ_1 y h_2 , tendremos $S_1 = h_1/\rho_1 = 0,5$; $S_2 = h_2/\rho_2 = 10,5$. De aquí deducimos $S_3 = 49$ mho y $h_3 = S_3 \cdot \rho_3 = 270$ m. Llegamos con ello al mismo resultado, $H \approx 500$ m.

Si se hubiera tomado el espesor total de las capas primera y segunda como abcisa del punto Q, como a veces se suele hacer en la práctica, entonces se introduciría un error de

signo negativo en el cálculo de H : $h_1 + h_2 = x_o = 200$ m, $H \approx 470$ m. En nuestro caso este error sería, por tanto, de un -6% .

Se ha visto un ejemplo de curva de SEV de tipo QH favorable para la interpretación cuantitativa. En él, la proporción entre el espesor de las capas h_2/h_1 y h_3/h_1 es suficientemente grande (de 7 a 9) y la segunda capa (h_2, ρ_2) queda señalada claramente en la curva de SEV. En la práctica, sin embargo, es frecuente el caso en que la proporción de espesores de las capas en el corte de tipo QH es pequeña y la rama descendente de la curva de SEV expresa las capas segunda y tercera como una sola, adquiriendo con ello la curva el aspecto de una de tres capas de tipo H (fig. 248 b).

En estos casos se dificulta mucho la interpretación de la curva de SEV, siendo los resultados menos exactos.

Sea el corte reflejado por la curva de SEV de la figura 248 b, en el que conocemos $\rho_2 = 17$ ohm.m; $\rho_3 = 2$ ohm.m; $\rho_4 = \infty$. Con ayuda del ábaco de dos capas calculamos $h_1 = 210$ m, $\rho_1 = 150$ ohm.m. Por consiguiente, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1/9$; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 1/75$.

No se introducirá un error de importancia si se pone $\rho_3/\rho_1 = 1/81$. Entonces, superponiendo la rama izquierda (descendente) de nuestra curva sobre el ábaco 66 ($\mu_1 = 1/9$, $\mu_2 = 1/81$) de modo que su origen de coordenadas coincida con el punto h_1, ρ_1 de la curva investigada, hallamos de modo aproximado que el valor $\nu_1 = h_2/h_1$ está comprendido entre 0,5 y 1. Dada la gran proximidad entre las curvas del ábaco no es posible calcular ν_1 de modo más exacto. Conocidos de modo aproximado los límites entre los que se halla la incógnita ν_1 es fácil calcular, con ayuda del ábaco Q, los límites de variación posible de la ordenada del punto Q: $y_o = 24$ ohm.m e $y_o = 31$ ohm.m. Por tanto, $\mu_o = \rho_3/y_o$ puede oscilar entre los límites $1/12$ y $1/16$ (con promedio de $1/14$). Por consiguiente, para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV examinada de tipo H se puede tomar el ábaco con $\mu_1 = 1/14$, $\mu_2 = \infty$.

Dado que en la colección de ábacos calculados no existe el correspondiente a tal parámetro μ_1 , habría que hallarlo gráficamente. Intentemos, sin embargo, hacer uso del ábaco de la colección que tiene un módulo contiguo al dado, suponiendo que en el corte examinado de tipo H es aplicable el principio de equivalencia. Utilizamos, por ejemplo, el ábaco 84 en que $\mu_1 = 1/9$. Haciendo uso de la línea μ_1 del ábaco Q hallamos, mediante interpolación, que la parte derecha de nuestra curva coincide del mejor modo con la curva de módulo $\nu_1 = 1,7$ del ábaco. Para dicha posición, el origen de coordenadas del ábaco señala en el impreso de SEV la posición del punto Q:

$$x_o = 320 \text{ m}; \quad y_o = 25 \text{ ohm.m}$$

En este caso, $h'_3 = x_o \cdot \nu_1 = 550$ m, $\rho'_3 = 25/9 \approx 2,8$ ohm.m. Pero el valor verdadero es $\rho_3 = 2$ ohm.m. En el diagrama de la

figura 71 se ve que para el corte estudiado de tipo H ($\nu_1 = 1,7$; $\mu_1 = 1/9$) puede ser aplicado el principio de equivalencia dentro de los límites exigidos (disminución de μ_1 hasta $1/12,5$). Por tanto, podemos hacer el cálculo del espesor. Tendremos,

$$h_3 = \frac{h'_3 \cdot \rho_3}{\rho'_3} \approx 400 \text{ m}$$

El valor h_2 lo calculamos con ayuda del ábaco Q como se ha indicado en el ejemplo anterior, $\nu_1 = 1$; $h_2 = \nu_1 h_1 = 210 \text{ m}$. Por consiguiente, la profundidad del horizonte de apoyo es $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 800 \text{ m}$.

Si interpretamos la curva partiendo del valor de S, hallamos $S = 223 \text{ mho}$; $S_1 = h_1/\rho_1 = 1,4 \text{ mho}$; $S_2 = h_2/\rho_2 = 12,4 \text{ mho}$; $S_3 \approx 209 \text{ mho}$; $h_3 = S_3 \cdot \rho_3 \approx 420 \text{ m}$, es decir, prácticamente el mismo que hallamos antes.

Errores de interpretación

El análisis de los resultados de la interpretación cuantitativa de las curvas teóricas de SEV del tipo QH ($\rho_4 = \infty$) pone de manifiesto que para valores pequeños de h_2/h_1 y h_3/h_1 (de 1 a 2) el error relativo de la interpretación $\Delta H/H$, incluso para un cálculo exacto de todos los parámetros iniciales (h_1, ρ_1, ρ_2 y ρ_3), puede ser de +15 a 20%. Ello está relacionado con los errores inevitables en el cálculo de la posición del punto Q. Al aumentar el valor de h_2/h_1 y h_3/h_1 , el error de interpretación disminuye.

Suponiendo solamente un error en la valoración de ρ_2 para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV de tipo QH introducimos un error en el cálculo tanto del espesor h_2 como del h_3 . El error de h_2 tiene signo opuesto al error cometido en la valoración de ρ_2 excediendo en valor absoluto bastante al error cometido en el cálculo de h_3 . Por ejemplo, el estudio de las curvas calculadas de SEV demuestra que para los valores relativamente pequeños indicados anteriormente de h_2/h_1 y h_3/h_1 un error de +70 a +300% en $\Delta \rho_2/\rho_2$ lleva consigo un error en el cálculo de h_2 de hasta -20 a -70% y en el cálculo de h_3 de hasta +10%.

Sabemos que en el caso de curvas de SEV de tres capas correspondientes a un corte de tipo Q ($\rho_3 = 0$) la magnitud del error de cálculo de h_2 en función del error en la valoración de ρ_2 puede calcularse aproximadamente por la fórmula (51).

Sin embargo, para el corte de cuatro capas de tipo QH en general no es posible utilizar esta expresión, ya que en este caso $\rho_3 \neq 0$ y $h_3 \neq \infty$.

La magnitud absoluta del error $\Delta h_2/h_2$ en función de $\Delta \rho_2/\rho_2$ para el corte de cuatro capas de tipo QH es menor que el obtenido por la fórmula (51) para el caso de curvas de tres capas de tipo Q ($\rho_3 = 0$) con el mismo error $\Delta \rho_2/\rho_2$.

Si en la curva de SEV de tipo QH que se interpreta se supone que hay un error en la valoración de ρ_3 , pero ρ_2 está calculado

exactamente, entonces el principal error de cálculo se introduce en el cálculo de h_3 . Sin embargo, la inexactitud en la valoración de ρ_3 lleva consigo también error en el cálculo de h_2 al interpretar la parte izquierda de la curva. Este error tiene signo contrario que el error en la valoración de ρ_3 y será tanto mayor cuanto mayor sea este último.

TABLA 48

ERRORES EN EL CALCULO DEL ESPESOR h_2 EN CURVAS DE SEV DE TIPO QH ($\rho_4 = \infty$) EN EL SUPUESTO DE QUE $\rho_3 = 0$

Relaciones entre los parámetros verdaderos del corte					h_2/h_1 , según los resultados de la interpretación, en el supuesto de que $\rho_3/\rho_2 = 0$	$\frac{\Delta h_2}{h_2}(\%)$
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_2}$		
1	2	1/19	1/361	1/19	1	0
1	2	1/4	1/64	1/16	1,3	+ 30
1	2	2/3	1/20	1/13	1,4	+ 40
1	2	1/9	1/81	1/9	1,5	+ 50
1	1	2/3	1/9	1/6	1,8	+ 80
1	2	2/3	1/9	1/6	1,8	+ 80
1	2	1/9	1/54	1/6	1,8	+ 80
1	2	1/4	1/16	1/4	1,8	+ 80
1	1	3/7	1/9	1/4	3	+200
1	1	2/3	1/4	1/2,7	2,5	+150
1	2	1/4	1/11	1/2,5	1,9	+ 90
1	2	1/4	1/9	1/2,3	2	+100

Con frecuencia, para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV de tipo QH no se dispone del valor conocido de ρ_3 y se toma $\rho_3 = 0$. A causa de ello, se obtienen valores de h_2 tanto más altos cuanto más se diferencie la verdadera relación ρ_3/ρ_1 de 0. La investigación del tema ha demostrado que el error es pequeño si $\rho_3/\rho_2 \leq 1/20$.

En la tabla 48 se tienen los resultados del cálculo de h_2 en la interpretación de la parte izquierda de las curvas calculadas de cuatro capas de tipo QH ($\rho_4 = \infty$) con ayuda de los ábacos de tres capas en el supuesto de que $\rho_3 = 0$.

Como se observa en la tabla, para valores relativamente pequeños de h_2/h_1 y h_3/h_1 , el error en el cálculo de h_2 puede ser muy alto, +100 a 200% en caso de $\rho_3/\rho_2 \geq 0$. Al aumentar h_2/h_1 y h_3/h_1 , el error disminuye.

El error en la valoración de h_2 relacionado con el error de cálculo del parámetro ρ_3 , origina también un error en el cálculo de la posición del punto Q lo que a su vez provoca un ligero error en la valoración de h_3 . Por tanto, podemos decir que el error máximo en el cálculo de h_3 procede del error en la valoración de ρ_3 para la interpretación de la parte derecha

de la curva. La magnitud de este error se puede expresar por la fórmula (35) obtenida en el estudio del error de interpretación de las curvas de SEV de tres capas de tipo H. Tan sólo debe tenerse presente que el papel de los parámetros h_1 y ρ_1 en este caso viene desempeñado por las coordenadas del punto Q, x_Q e y_Q y el de los parámetros h_2 y ρ_2 , por los valores h_3 y ρ_3 ; por tanto, la fórmula adquiere la expresión:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \frac{\Delta \rho_3}{\rho_3} \%$$

La expresión que relaciona el error de cálculo de h_3 con el error en la valoración no sólo de ρ_3 , sino también en la posición del punto Q, se expresa, por la fórmula (40), del modo siguiente:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left[\frac{x_Q}{h_3} \cdot \frac{K_3 \cdot \rho_3}{K_2 \cdot y_Q} (n - m) + p \right] \% \quad (78)$$

En ella, p es el error (%) en el cálculo de ρ_3 ; m el error (%) en el cálculo de x_Q ; n el error (%) en el cálculo de y_Q ; K_2 el coeficiente de error en el cálculo de y_Q ; K_3 el coeficiente de error en el cálculo de ρ_3 .

Los errores en el cálculo de h_3 relacionados con el error en la valoración de ρ_4 (para $\rho_4 \neq \infty$) pueden hallarse por las gráficas de las figuras 148 y 150 correspondientes al corte de tres capas de tipo H. Igual que en el caso anterior, no hay que olvidar que el papel de h_1 y ρ_1 , lo desempeñan respectivamente x_Q e y_Q y el papel de h_2 y ρ_2 , h_3 y ρ_3 , respectivamente.

Los errores de interpretación de curvas de SEV de tipo QH expresadas de modo confuso y consideradas como de tres capas de tipo H menospreciando la capa h_2 , ρ_2 o h_3 , ρ_3 ya lo hemos considerado.

Se comprueba fácilmente que la expresión del error de interpretación en las curvas de SEV de tipo QH para $\rho_4 = \infty$ en función del error en la valoración de los parámetros iniciales del corte h_1 , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 no se diferencia en nada de la expresión de ese mismo error para las curvas de SEV de tipo KH. Sin embargo, en la práctica, la interpretación de la parte izquierda de las curvas de SEV de tipo QH es causa de errores muy diferentes a veces de los calculados. Por ello, el error práctico en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo puede no ser totalmente coincidente en magnitud absoluta en el calculado. La fórmula de error para la interpretación de las curvas de SEV de tipo QH puede, por tanto, usarse tan sólo para una valoración aproximada del orden de magnitud de dicho error.

CURVAS DE SEV DE TIPO HA

Las curvas de SEV de tipo HA (fig. 249) se interpretan del mismo modo que las curvas de cuatro capas de otros tipos.

Conociendo de antemano ρ_2, ρ_3 y calculando previamente por el ábaco de dos capas las magnitudes h_1 y ρ_1 se hallan $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$. A continuación, prescindiendo de la rama final derecha de la curva de SEV, con ayuda del ábaco de tres capas de tipo H para los valores hallados μ_1 y μ_2 (si no existe en la colección tal ábaco hay que construirlo gráficamente) se interpreta la parte izquierda de la curva. El ábaco precisa los valores h_1 y ρ_1 ; por él se halla también el valor h_2 . El ábaco auxiliar H (fig. 55) permite hallar en el impreso de SEV la posición del punto H (x_H, y_H) para el valor μ_1 dado. De aquí se calcula $\mu_H = \rho_3/y_H$ y ρ_4/y_H . Con estos módulos se elige el ábaco de tres capas de tipo A para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV. En él y partiendo de la posición del punto H se calcula $\nu_H = h_3/x_H$ y, por consiguiente, h_3 . Ello soluciona el problema de la interpretación: $H = x_H + h_3 = h_1 + h_2 + h_3$. Si en la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV aparece el punto H algo desplazado respecto a su posición primitiva, se toma como punto inicial la última posición del mismo.

Sea en el corte de tipo HA reflejado por la curva de SEV citada en la figura 249, $\rho_2 = 9$ ohm.m, $\rho_3 = 80$ ohm.m, $\rho_4 = \infty$. Interpretando la parte izquierda de la curva con ayuda del ábaco 54 ($\mu_1 = 1/9, \mu_2 = 1$) hallamos $h_1 = 20$ m, $\rho_1 = 80$ ohm.m, $\nu_1 = 2, h_2 = 40$ m.

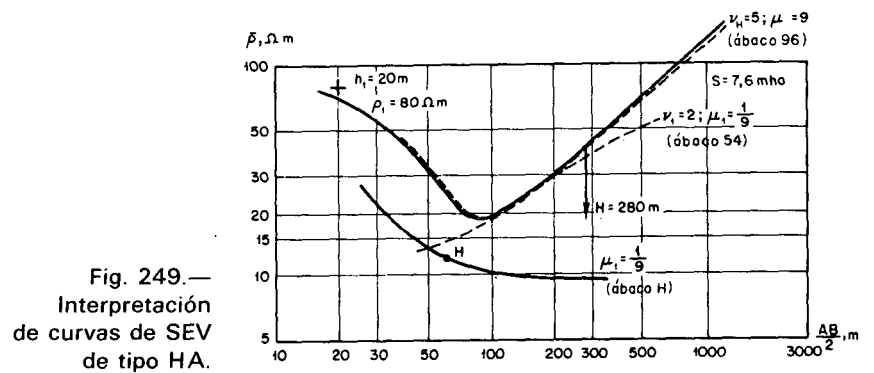


Fig. 249.— Interpretación de curvas de SEV de tipo HA.

Con ayuda del ábaco auxiliar H, calculamos la posición del punto H:

$$x_H = 60 \text{ m}, \quad y_H = 12 \text{ ohm.m}$$

De aquí, $\mu_H = \rho_3/y_H \approx 7$. No hay en la colección un ábaco de tipo A con tal módulo. Teniendo en cuenta que en el corte de tipo A es ampliamente aplicable el principio de equivalencia en S, usamos $\mu_H = 9$. Entonces utilizando el ábaco 96 ($\mu_1 = 9, \mu_2 = \infty$), hallamos la posición para el punto H:

$$\nu_H = h_3/x_H = 5$$

De aquí, $h'_3 = 300$ m para $\rho'_3 = 12 \cdot 9 = 108$ ohm.m. Reduciendo, según el principio de equivalencia, el espesor de la tercera capa a la resistividad $\rho_3 = 80$ ohm.m, obtenemos $h_3 = 300 \cdot 80/108 = 220$ m. Por consiguiente, $H = x_H + h_3 = 280$ m. La profundidad verdadera en el punto

dato es de 300 m. El error de interpretación en este caso ($h_3 = 12 \cdot h_1$) es, en total de un +7% con un conocimiento exacto de los parámetros ρ_2 y ρ_3 . Sin embargo, para valores pequeños de las relaciones h_2/h_1 y h_3/h_1 (de 1 a 2) y como evidencia el análisis de las curvas calculadas de SEV de tipo HA, el error de interpretación $(\Delta H/H) \cdot 100$ es de hasta ± 15 a $\pm 20\%$ si la relación ρ_3/γ , no excede de 10 a 15. Si esta relación crece hasta 20 y más, entonces la exactitud de la interpretación de la parte derecha de las curvas de SEV de tipo A de los ábacos que se utilizan para la interpretación de la parte derecha de las curvas de SEV de este tipo HA, se encuentran ya para $\mu_1 = 19$ muy próximas entre sí hasta la curva de módulo $\nu_1 = 3$ y con ello la evaluación de h_3/x_H se efectúa con estas condiciones con gran posibilidad de error. Por consiguiente, para h_3 pequeño y ρ_3 elevado, la interpretación de las curvas de SEV de tipo HA tiene grandes errores, aún en el caso de un cálculo exacto de los parámetros iniciales.

En la tabla 49, según el análisis de las curvas de SEV calculadas de tipo HA ($\rho_4 = \infty$) se tienen los valores mínimos de h_3/x_H que permiten la interpretación de las curvas con suficiente exactitud ($\pm 15\%$) para diferentes h_3/γ_H .

TABLA 49

VALORES MINIMOS DE h_3/x_H PARA LOS QUE ES POSIBLE LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV DE TIPO HA CON EXACTITUD SUPERIOR A $\pm 15\%$

ρ_3/γ_H	Valor h_3/x_H
3/2	1/5
4	1/2
9	1
19	3
39	5

Si se da un corte eléctrico de tipo HA, tal que para un valor conocido de ρ_3/γ_H y la relación h_3/x_H es menor que el correspondiente valor indicado en la tabla 49, entonces el resultado de la interpretación de la curva de SEV puede ser muy inexacto. Por ejemplo, para h_2/h_1 y h_3/h_1 iguales a 1, $\rho_2/\rho_1 = 1/4$ y $\rho_3/\rho_1 = 9$ ($\rho_3/\gamma_H \approx 20$, $h_3/x_H = 0,5$), el error de interpretación $(\Delta H/H) \cdot 100$ es el del orden de +50%.

La interpretación de las curvas se facilita algo si $\rho_4 = \infty$. En este caso, calculando con la parte izquierda de la curva de SEV los valores h_1 , ρ_1 y h_2 y tomando de la curva la magnitud S , se calcula $S_1 = h_1/\rho_1$, $S_2 = h_2/\rho_2$ y $S_3 = S - (S_1 + S_2)$, de donde, con ayuda del valor conocido ρ_3 se calcula $h_3 = S_3 \cdot \rho_3$. En el ejemplo anterior, $S = 7,6$; $S_1 = 0,25$; $S_2 = 4,44$; $S_3 = 2,91$. Teniendo en cuenta que $\rho_3 = 80$ ohm.m, hallamos $h_3 \approx 230$ m y, por consiguiente, $H \approx 290$ m.

Errores de interpretación

La interpretación de la parte izquierda de las curvas de SEV de tipo HA en el supuesto de cometer sólo error en la

valoración de ρ_2 se traduce en error en el cálculo de h_2 . En este caso, $\Delta h_2/h_2 \approx \Delta \rho_2/\rho_2$. Al interpretar la parte izquierda de las curvas de tipo considerado se introducen con frecuencia errores en la valoración de ρ_3 . Por el estudio de las curvas de SEV de tres capas de tipo H se sabe que dicho error provoca otro error del mismo signo en la valoración de h_2 . Por lo tanto, suponiendo en la interpretación de la parte izquierda de las curvas de SEV de tipo HA errores del mismo signo en la valoración de ρ_2 y ρ_3 aumentamos el valor absoluto del error en el cálculo de h_2 con ese mismo signo. Si los errores en la valoración de ρ_2 y ρ_3 tienen diferente signo, los mismos influirán en sentido opuesto en el error de cálculo de h_2 .

En particular, si se supone $\rho_3 = \infty$ para $h_2/h_1 = h_3/h_1 = 1$, entonces en caso de $\rho_3/\rho_2 \geq 20$ y cálculo exacto de ρ_2 , el error en la valoración de h_2 se reduce a cero; para $\rho_3/\rho_2 \geq 10$ el error no excede de +10% y crece hasta +30 a +50% si ρ_3/ρ_2 desciende hasta 4-2.

El cálculo erróneo de h_2 y ρ_2 provoca un error en el cálculo de la posición del punto H. Si $\Delta h_2/h_2$ y $\Delta \rho_2/\rho_2$ tienen el mismo signo (para error, asimismo, en la valoración de ρ_3), entonces los errores $\Delta x_H/x_H$ y $\Delta y_H/y_H$ tienen el mismo signo que el del error en la valoración de h_2 y ρ_2 .

El cálculo erróneo de la posición del punto H provoca un error en la valoración de h_3 . El orden de magnitud de este error puede ser calculado aproximadamente por la fórmula análoga a la obtenida para las curvas de SEV de tipo H o A:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \frac{x_H}{h_3} \cdot \frac{\rho_3}{y'_H} (n - m)\%, \quad (79)$$

en la que x_H es el valor verdadero de la abscisa del punto H que se obtendría para un cálculo exacto de los parámetros iniciales; y'_H la ordenada erróneamente calculada del punto H; n y m los errores (en %) en la valoración de y_H y x_H .

El análisis del tema demuestra que el error en el cálculo de h_3 en caso de error en la valoración de ρ_2 y valores pequeños de h_2/h_1 y h_3/h_1 , puede alcanzar grandes valores, pero de signo opuesto al error en la valoración de h_2 . Por ejemplo, para $h_2/h_1 = h_3/h_1 = 1$, $\rho_2/\rho_1 = 1/39$, $\rho_3/\rho_1 = 1/9$, $\rho_4 = \infty$, suponiendo un error en la valoración de ρ_2 del orden de +100% y suponiendo también para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV $\rho_3 = 0$, tenemos en el cálculo de h_2 un error del orden de +150% y en el de h_3 del orden de -60%. El error $\Delta H/H$ en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo es del orden de +30%. Si para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV de tipo HA se supone también error en la valoración de ρ_3 , entonces la expresión para la valoración aproximada del error total introducido en h_3 , puede ser la siguiente:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left[\frac{x_H}{h_3} \cdot \frac{\rho'_3}{y'_H} (n - m) + p \right]\%, \quad (80)$$

en la que ρ'_3 es el valor erróneo de ρ_3 y p el error (en %) en el cálculo de ρ_3 .

En caso de existir error solamente en la valoración de ρ_3 en un $p\%$, el error en el cálculo del espesor de la tercera capa es $(\Delta h_3/h_3) \cdot 100 = p\%$.

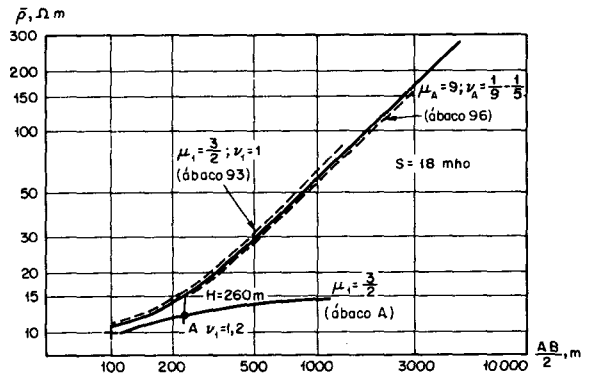
Para el cálculo del error de interpretación $\Delta h_3/h_3$ en el corte de tipo HA ($\rho_4 = \infty$) producido por un error $L\%$ en la valoración del parámetro S , puede utilizarse la fórmula (61).

El error de interpretación en las curvas de SEV de tipo HA al ser consideradas como de tres o dos capas, ya ha sido tratado.

CURVAS DE SEV DE TIPO AA

El corte de tipo AA es de los más desfavorables para la exploración eléctrica. Las curvas de SEV que reflejan este corte normalmente son monótonas y no suelen distinguirse de las curvas de tres capas de tipo A e incluso de las de dos capas (fig. 250). La interpretación de tales curvas suele ser errónea incluso para el caso de ser exactamente conocidas las resistividades paramétricas de las capas del corte.

Fig. 250.—
Interpretación
de curvas de
SEV de tipo A A.



La interpretación de las curvas de SEV de tipo AA se suele hacer generalmente mediante el uso del ábaco auxiliar A y de los ábacos de curvas de SEV de tres capas de tipo A.

Conocidos ρ_2 , ρ_3 y, por consiguiente, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$, por el ábaco de tres capas de tipo A se calculan h_1 , ρ_1 y h_2 . Esto permite, mediante el uso del ábaco auxiliar A, hallar la posición del punto A (x_A , y_A). A continuación, partiendo de esta posición y conociendo $\mu_A = \rho_3/y_A$, con ayuda del ábaco de tres capas de tipo A, se hallan $\nu_A = h_3/x_A$ y de aquí, h_3 .

Sea por ejemplo un punto de SEV cuya curva de tipo AA se presenta en la figura 250. En él, $\rho_2 = 15$ ohm.m, $\rho_3 = 90$ ohm.m. Tomando para la parte inicial de la curva $\rho_1 = 10$ ohm.m, hallamos $\mu_1 = 3/2$, $\mu_2 = 9$. Utilizamos para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV el ábaco 93 ($\mu_1 = 3/2$, $\mu_2 = \infty$). Suponiendo $\mu_2 = \infty$ en lugar de 9,

obviamente introducimos un error de signo positivo en el cálculo de h_2 . Hallamos $h_1 = 100$ m $\rho_1 = 10$ ohm.m, $\nu_1 = 1,2$; de aquí, $h_2 = 120$ m. Con ayuda del ábaco A hallamos la posición del punto A: $x_A = 225$ m, $y_A = 12$ ohm.m.

Por tanto, $\mu_A = \rho_3 / y_A = 7,5$. Tomamos el ábaco 96 de módulo contiguo $\mu_1 = 9$. Haciendo coincidir el origen de coordenadas del ábaco con el punto A hallamos que la rama ascendente de la curva de SEV dada, queda en una zona del ábaco en la que las curvas están muy próximas entre sí, haciéndose el cálculo de ν_A muy impreciso, pudiendo ser su valor lo mismo $1/9$ que $1/5$. El valor ρ_3 para este caso es $12 \cdot 9 = 108$ ohm.m. Tomando el máximo $\nu_A = 1/5$, hallamos $h'_3 = y_A \cdot x_A \approx 45$ m. Reducimos este valor, según el principio de equivalencia, a la resistividad $\rho_3 = 90$ ohm.m; en este caso, $h_3 = 40$ m y $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 260$ m. El valor verdadero de la profundidad del horizonte de apoyo en el punto considerado de SEV es de 300 m; de aquí que el error de interpretación es del orden del 13%. Tomando $\nu_A = 1/9$, el error sería de un -20% .

Si $\rho_4 = \infty$, como por ejemplo en el caso dado, entonces la curva se puede interpretar algo más fácilmente, partiendo del valor $S_3 = S - (S_1 + S_2)$. Tomamos en la curva $S = 18$ mho, $S_1 = h_1 / \rho_1 = 10$; $S_2 = h_2 / \rho_2 = 8$; $S_3 = 0$; $h_3 = 0$ m. Se hallaría de este modo una profundidad del horizonte de apoyo de 220 m, con error de -30% . Un error grande con signo negativo surge aquí a causa de haber tomado un valor exagerado del espesor h_2 al interpretar la parte izquierda de la curva de SEV. Para ρ_3 grande en comparación con ρ_1 y ρ_2 , entonces incluso una disminución insignificante de S está relacionada con una fuerte disminución de h_3 . En el caso considerado, la magnitud h_3 desciende a cero a causa del error de cálculo de h_2 .

La investigación de los ábacos demuestra que es posible la interpretación de las curvas de SEV de tipo AA con una exactitud aceptable (hasta ± 10 a $\pm 15\%$) si el corte es tal que el valor h_3 / x_A , para diferentes ρ_3 / y_A , satisface las mismas condiciones que el valor h_3 / x_H para los mismos ρ_3 / y_H en el corte de tipo HA (tabla 49). Los resultados de la interpretación de las curvas de SEV de tipo AA, incluso para el caso de ser exactamente conocidos los parámetros ρ_2 y ρ_3 , pueden ser bastante erróneos si en el corte, para un valor dado de ρ_3 / y_A , la relación h_3 / x_A es mucho menor que la indicada en las tablas.

También se cometen errores de interpretación en las curvas de cuatro capas de tipo AA, cuando a causa de su aspecto se interpretan como de tres o incluso dos capas. Ya nos hemos ocupado anteriormente de este tipo de errores.

Con frecuencia la inexactitud en la interpretación de las curvas de SEV de tipo AA de cuatro capas consideradas como de tres capas, suele ser al ignorar la capa h_3 , ρ_3 . Con ello se producen errores en el sentido de disminuir la profundidad del horizonte de apoyo. En magnitud absoluta, los mismos no suelen exceder de los errores cometidos al interpretar las curvas como de cuatro capas, incluso para valores exactamente conocidos de los parámetros ρ_2 y ρ_3 .

De los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo AA que van ligados con errores de cálculo de los parámetros ρ_2 y ρ_3 , se puede decir lo mismo que en el caso de la interpretación de las curvas de tipo HA. Dichos errores se valoran por fórmulas análogas. También por las mismas fórmulas se calcula el error en función del error en la valoración de S. E igualmente que en el corte de tipo HA un error pequeño en la valoración de S lleva consigo, para ρ_3 grande en comparación con ρ_1 y ρ_2 , un error grande en la valoración de h_3 .

35. Curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ, QQ y su interpretación

Las curvas de SEV de cuatro capas de estos tipos reflejan un corte eléctrico en el que el horizonte de apoyo está constituido por rocas más conductoras que la capa suprayacente. En particular, ρ_4 puede ser muy pequeño ($\rho_4=0$).

En la práctica, un corte eléctrico con horizonte de apoyo conductor se encuentra rara vez. Las curvas de SEV correspondientes son más complejas de interpretar que las correspondientes a SEV que reflejan un corte con horizonte de apoyo de alta resistividad. La exactitud en su interpretación es habitualmente menor que en este último caso.

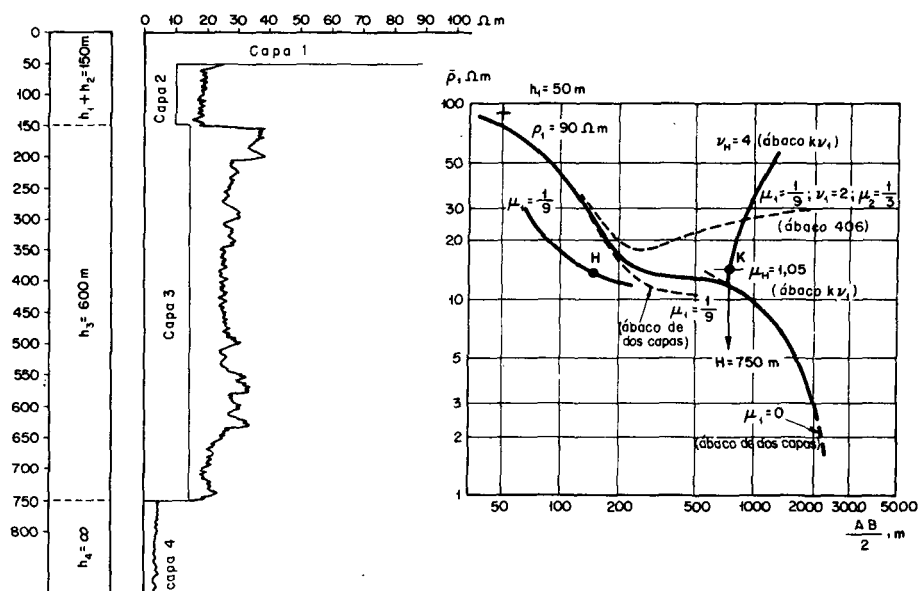
No nos pararemos en los métodos de interpretación cualitativa de las curvas de SEV de los tipos HK, AK, KQ y QQ. Dichos métodos no se diferencian en realidad de los de interpretación cualitativa de las curvas de cuatro capas del primer grupo. También tiene mucho en común la interpretación cualitativa de las curvas del tipo que se considera, con la de las curvas de SEV de tres capas de los tipos K y Q. Hay que hacer hincapié una vez más en la necesidad de un análisis esmerado de todo el material de SEV basado en los estudios geológicos, hidrogeológicos y datos de otro tipo de la región explorada antes de iniciar la interpretación cuantitativa.

CURVAS DE SEV DE TIPO HK

Actualmente se tienen calculadas 26 curvas de SEV para diversos valores de los parámetros del corte de tipo HK. El estudio de estas curvas es fácil en virtud de lo expuesto hasta aquí.

Veamos en primer lugar el cálculo de los parámetros ρ_2 y ρ_3 mediante curvas de SEV realizadas próximas a un pozo perforado. Sean, por ejemplo, el diagrama de testificación de este sondeo mecánico y la curva de SEV los citados en la figura 251.

Fig. 251.—Cálculo de ρ_2 y ρ_3 para curvas de SEV de tipo HK próximas a un sondeo mecánico.



La diagraffía admite la posibilidad de dividir el corte al menos en tres horizontes eléctricos claramente delimitados; para ellos, $h_1 + h_2 = 150$ m, $h_3 = 600$ m. En cuanto a la curva de SEV junto al sondeo mecánico, que se ha llevado hasta una separación $AB = 4000$ m, evidencia que el corte es de tipo HK. La interpretación de la parte izquierda de la curva con ayuda del ábaco de dos capas demuestra que $h_1 = 50$ m, $\rho_1 = 90$ ohm.m. De aquí, $h_2 = 150 - h_1 = 100$ m; $\nu_1 = h_2/h_1 = 2$. Para escoger el ábaco necesario para la interpretación de la parte izquierda de la curva se debe estimar el valor de $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$. Según la diagraffía, ρ_3 no debe ser mayor de 30 ohm.m. Por tanto, teniendo en cuenta el valor de ρ_1 , se puede suponer que μ_2 no excede de $1/3$. Por ello, para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV, se tomará el ábaco de tipo H en que es $\nu_1 = 2$, μ_1 es variable y $\mu_2 = 1/3$. En la colección no existe tal ábaco. Probamos por ello a utilizar el ábaco 406, en que $\nu_1 = 2$, $\mu_2 = (\rho_2/\rho_1)^2$. Llevando al mismo el impreso con nuestra curva de SEV, vemos que la curva del ábaco que mejor coincide con la parte izquierda de la gráfica es la correspondiente a $\mu_1 = 1/9$. Tomamos, por tanto, $\rho_2 = \rho_1/9 = 10$ ohm.m.

Con ayuda del ábaco auxiliar H, podemos fijar la posición del punto H: $x_H = 150$ m; $y_H = 13,5$ ohm.m. De aquí, $\nu_H = h_3/x_H = 4$; ρ_4 se supone igual a cero.

En la colección de curvas de SEV de tres capas no existen ábacos con tal parámetro ν_1 . Solucionaremos el problema con ayuda del ábaco K ν_1 . Haciendo coincidir el punto H dado con el origen de coordenadas del ábaco correspondiente a $\nu_1 = 4$, llevamos al impreso la curva con este módulo ν_1 . Como sabemos, sobre ella debe estar situado el punto K. Su posición la hallamos como de costumbre con ayuda del ábaco de dos capas. El origen de coordenadas de este último estará situado en el punto K al coincidir la curva $\mu_1 = 0$ del ábaco con la rama final descendente de la curva dada de SEV. Superponiendo de nuevo, como antes, el impreso del SEV con

el ábaco K ν_1 , hallamos que por punto K señalado pasa la curva del ábaco $\mu_1 = \mu_H = 1,05$. De aquí $\rho_3 = \mu_H \cdot \gamma_H \approx 14$ ohm.m.

La solución del problema es, por tanto, $\rho_2 = 10$ ohm.m, $\rho_3 = 14$ ohm.m. La exactitud del cálculo, supuesta una valoración precisa de la posición del límite de separación de los horizontes eléctricos y exacta medición en la obtención de la curva de SEV es el del orden de ± 10 a $\pm 15\%$. Los errores, como de costumbre en la interpretación de las curvas de SEV provienen de inexactitud en la coincidencia con los ábacos, en la transferencia de puntos y curvas de los mismos al impreso y también de la metodología misma de la interpretación, de tipo aproximado, derivada de los métodos empíricos de construcción gráfica de las curvas de SEV.

La curva de SEV considerada es poco favorable para su interpretación como de cuatro capas, ya que el tercer horizonte, a pesar de su gran espesor, no queda claramente expresado en la misma a causa de la escasa diferencia de valor entre ρ_2 y ρ_3 . La parte media de la gráfica es casi horizontal ($\bar{\rho} = 13$ ohm.m). Por su aspecto, la curva no se diferencia de la gráfica de una curva de SEV de tipo Q que reflejase un corte de tres capas con su capa segunda de gran espesor. Si para el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo conductor se considera esta curva como de tres capas y, prescindiendo de su rama izquierda, se interpreta la derecha con ayuda del ábaco de dos capas, suponiendo una resistividad media de los dos niveles superiores próxima a $\rho_{1+2} = 13$ ohm.m, entonces hallamos un valor de la profundidad incógnita muy próximo al verdadero: $H \approx 750$ m. De este modo, es como suelen interpretarse las curvas de SEV de tipo HK, como un tramo intermedio horizontal originado por el gran espesor de la tercera capa y que se diferencia escasamente en cuanto a su resistividad de la segunda capa. En este caso, como vemos, no es necesario en absoluto conocer los parámetros ρ_2 y ρ_3 .

Veamos ahora el caso de la interpretación de una curva de cuatro capas de tipo HK expresada con suficiente claridad (fig. 252). Supongamos conocidos $\rho_2 = 6,6$ ohm.m y $\rho_3 = 60$ ohm.m ($\rho_4 = 0$). Calculando de modo aproximado $\rho_1 \approx 60$ ohm.m, hallamos $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1/9$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 1$.

Para la interpretación de la parte izquierda de la curva, utilizamos el ábaco 54 ($\mu_1 = 1,9$; $\mu_2 = 1$). Ello permite calcular $h_1 = 100$ m; $\rho_1 = 60$ ohm.m; $\nu_1 = 2,3$ y de aquí, $h_2 \approx 230$ m. Utilizando el ábaco H, hallamos la posición del punto H: $x_H = 330$ m; $\gamma_H = 9,2$ ohm.m. De aquí, $\mu_H = \rho_3/\gamma_H = 6,5$.

Para la interpretación de la parte derecha de la curva habría que utilizar el ábaco de tipo K en que $\mu_1 = 6,5$, $\mu_2 = 0$. Teniendo en cuenta que al corte examinado es aplicable el principio de equivalencia, tomamos en la colección el ábaco de módulo contiguo $\mu_1 = 9$ (ábaco 90). Para la interpretación de la parte derecha de la curva con ayuda de este ábaco hay que desplazar algo el punto H, porque la posición hallada no da la posibilidad de hacer coincidir la parte considerada de la

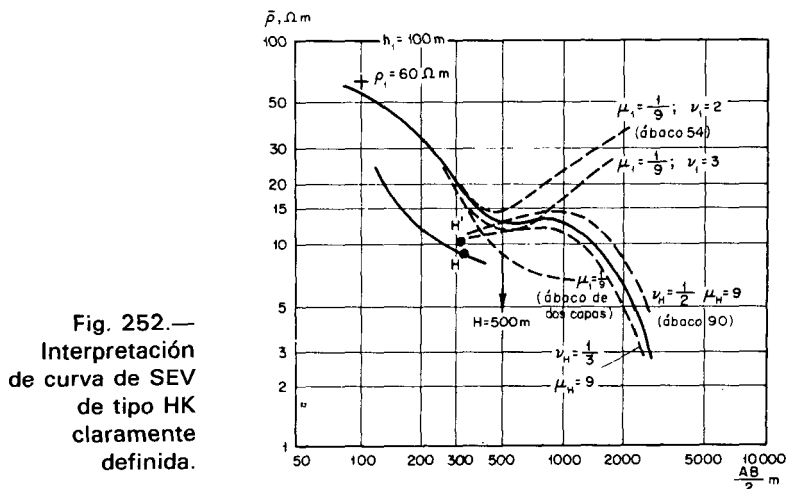


Fig. 252.— Interpretación de curva de SEV de tipo HK de tipo HK claramente definida.

curva con ninguna curva del ábaco. La posición rectificada del punto H tiene por coordenadas:

$$x_H = 320 \text{ m}; \quad y_H = 10 \text{ ohm.m}$$

Interpolando entre las curvas de SEV del ábaco, hallamos $\nu_H = 0,38$ y, por tanto, $h'_3 = \nu_H \cdot x_H = 120 \text{ m}$ para $\rho_3 = 90 \text{ ohm.m}$. En realidad, $\rho_3 = 60 \text{ ohm.m}$. Rehaciendo el cálculo, teniendo en cuenta el principio de equivalencia, hallamos $h_3 = 120 \cdot 90 / 60 = 180 \text{ m}$. De aquí obtenemos la profundidad del horizonte de apoyo $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 500 \text{ m}$. El análisis de las curvas de SEV de tipo HK demuestra que la exactitud de su interpretación en el caso de forma de la curva claramente expresada y parámetros ρ_2 y ρ_3 exactamente conocidos, para h_2/h_1 y h_3/h_1 entre 2 y 3, es de un $\pm 10\%$. Al aumentar h_2/h_1 y h_3/h_1 , crece la exactitud de la interpretación.

Al disminuir el espesor de las capas h_2 o h_3 o para espesor de las mismas variable, pero escasa diferencia entre sus resistividades, las curvas de tipo HK no se diferencian en apariencia de las curvas de tres capas de tipo Q. Por ejemplo, la gráfica de SEV considerada en el ejemplo anterior se transforma en la curva citada en la figura 253 al permanecer invariables las proporciones de espesores y los parámetros ρ_1 y ρ_2 y disminución de ρ_3 hasta 10 ohm.m . Tal curva no es posible interpretarla como de cuatro capas. Se puede por el contrario interpretar claramente como de tres capas (no se tiene en consideración la capa h_3, ρ_3) de tipo Q con ayuda del ábaco 78 ($\mu_1 = 1/9, \mu_2 = 0, \nu_1 = 5$), pero en este caso el valor H calculado es igual a 600 m , es decir, el error de cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo es de $+20\%$. Si se menosprecia la capa h_2, ρ_2 en la interpretación de las curvas de SEV de tipo HK se disminuye el valor H.

Errores de interpretación

Al interpretar la parte izquierda de la curva de SEV de tipo HK con ayuda del ábaco de tres capas de tipo H en caso de ρ_2 conocido exactamente, pero no el valor de ρ_3 , cometemos errores en la valoración de h_2 . Dicho error, a igualdad de las restantes condiciones, será tanto mayor cuanto mayor sea el

valor ρ_3/ρ_2 tomado para la interpretación respecto al verdadero y menores h_2/h_1 (figs. 148 y 150) y h_3/h_1 .

El error en el cálculo de h_2 , como es lógico, lleva consigo un error en el cálculo de la posición del punto H y mientras que Δx_H tiene el mismo signo que Δh_2 , Δy_H lo tiene opuesto. Estos errores originan error en la valoración de h_3 , aún en el caso de que en la valoración de la parte derecha de la curva se hubiera tomado el valor verdadero de ρ_3 . El signo del error es opuesto al del error en el cálculo de h_2 y, por consiguiente, de x_H .

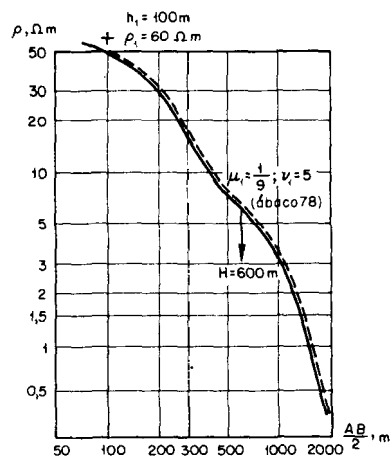


Fig. 253.— Interpretación de curva de SEV de tipo HK como curva de tres capas de tipo Q.

Por tanto, en caso de error en la valoración de ρ_3 en el proceso de interpretación de la parte izquierda de las curvas de SEV de tipo HK, los errores en el cálculo de h_2 y h_3 tienen signo opuesto y la magnitud de los errores de interpretación no se acumulan.

En la tabla 50 se tienen ejemplos de resultados de interpretación de curvas teóricas de SEV de tipo HK ($\rho_4 = \infty$) en caso de error en la valoración de ρ_3 para la interpretación de la parte izquierda.

TABLA 50

ERRORES DE INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV DE TIPO HK ($\rho_4 = \infty$) EN FUNCION DEL ERROR EN LA VALORACION DE ρ_3 PARA LA INTERPRETACION DE SU PARTE IZQUIERDA

Relación entre los parámetros verdaderos del corte de tipo HK					Valores de ρ_3/ρ_2 tomados para la interpretación	Error de interpretación (%)		
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_2}$		$\frac{\Delta h_2}{h_2}$	$\frac{\Delta h_3}{h_3}$	$\frac{\Delta H}{H}$
2	12	1/9	1/6	1,5	9	+250	-32	+ 8
24	12	1/9	1/6	1,5	9	0	0	0
2	2	1/9	1	9	9	+ 30	-34	- 2
2	2	2/3	6	9	∞	+ 50	-10	+16
2	12	2/3	6	9	∞	+ 15	- 7	- 4

Como se aprecia en la tabla 50 se pueden presentar también errores en el cálculo de h_2 (y h_3), para valores relativamente pequeños de h_2/h_1 , h_3/h_1 , aún en el supuesto de tomar ρ_3 igual a su valor verdadero. Ello va relacionado con la forma de la curva de SEV, expresada de modo poco claro, que dificulta la interpretación de su parte izquierda.

Si en la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV de tipo KH se introduce error en la valoración no sólo del parámetro ρ_3 , sino también en la del ρ_2 , ello se refleja en primer lugar en el cálculo de h_2 . Sabemos que en el caso de curvas de SEV de tres capas de tipo H la suposición de un error en el cálculo de ρ_2 provoca el mismo error en la valoración de h_2 :

$$\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} = \frac{\Delta h_2}{h_2}$$

La investigación de las curvas calculadas de SEV de tipo HK en caso de interpretación de las mismas con valor erróneo de ρ_2 demuestra (tabla 51) que la anterior igualdad se conserva de modo aproximado también para el caso de las curvas de cuatro capas del tipo considerado.

Un error en la valoración de ρ_2 , al causar error en el cálculo de h_2 origina también error en el cálculo de la posición del punto H. En este caso, Δx_H y Δy_H tienen el mismo signo que también lo es del error $\Delta \rho_2$ (y Δh_2).

El error en el cálculo de la posición del punto H lleva consigo un error en el cálculo de h_3 de signo opuesto al Δh_2 . El valor absoluto del error $\Delta h_3/h_3$ en comparación con $\Delta h_2/h_2$, cuando se toma exactamente el parámetro ρ_3 , es pequeño (tabla 51).

TABLA 51

ERRORES DE INTERPRETACION DE CURVAS DE SEV DE TIPO HK ($\rho_4 = 0$) CAUSADOS POR UN ERROR EN LA VALORACION DE ρ_2

Relaciones entre los parámetros verdaderos del corte de tipo HK					Valores de ρ_3/ρ_2 tomados para la interpretación	Error $\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2}$	Error de interpretación en %		
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_2}$			$\frac{\Delta h_2}{h_2}$	$\frac{\Delta h_3}{h_3}$	$\frac{\Delta H}{H}$
2	3	1/39	9	351	—	+104	+100	-11	+30
2	2	1/9	1	9	19	-52	-50	+4	-19
2	12	1/9	1	9	19	-52	-50	+1	-1
2	2	2/3	6	9	—	-36	-30	+10	-8

Por consiguiente, el error total en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo en caso de error en la valoración de ρ_2 se calcula del mismo modo que el error Δh_2 . Este error total

$\Delta H/H$, debido a los errores Δh_2 y Δh_3 que tienen signos opuestos, es en magnitud absoluta mucho menor que $\Delta h_2/h_2$, sobre todo si h_3 es pequeño en comparación con h_2 .

Como ya se ha indicado, en caso de interpretación de la parte izquierda de las curvas de SEV de tipo HK mal definidas, es difícil, aún conociendo los parámetros ρ_2 y ρ_3 , calcular el espesor de la segunda capa h_2 . En tal caso, se utiliza el método siguiente.

Para un módulo dado $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ se transfiere del ábaco auxiliar H la curva correspondiente a este módulo al impreso de la curva de SEV. Se calculan en ella aproximadamente los límites posibles de variación de la posición del punto H y se interpreta la parte derecha de la curva dada de SEV con ayuda del ábaco de curvas de tres capas de tipo K con módulos próximos a $\mu_1 = \rho_3/\gamma_H$ y $\mu_2 = \rho_4/\gamma_H$, siendo γ_H el valor aproximado de la ordenada del punto H. El origen de coordenadas de este ábaco, que se desplaza a lo largo de la curva H hasta la coincidencia de alguna curva del ábaco de módulo ν_1 con la parte derecha de nuestra gráfica de SEV, señala la posición del punto H. La abscisa x_H de este punto se toma, como de costumbre, igual a $h_1 + h_2$ y el producto de ν_1 por x_H , reducido por el principio de equivalencia a la magnitud de la resistividad verdadera ρ_3 , da la incógnita h_3 .

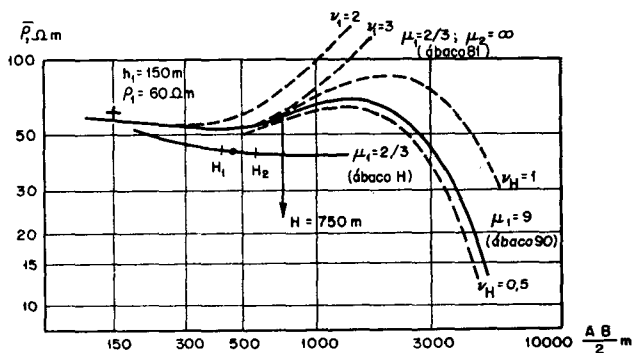


Fig. 254.—Método de interpretación aproximada de curvas de SEV de tipo HK.

Veamos un ejemplo de tal interpretación. Para la curva de SEV de tipo HK (fig. 254) correspondiente al corte en que $\rho_2 = 40$ ohm.m; $\rho_3 = 360$ ohm.m, y $\rho_4 = 0$, es difícil calcular con suficiente seguridad h_2 . El ábaco 81 de las curvas de tres capas de tipo H, con módulos $\mu_1 = 2/3$ y $\mu_2 = \infty$, indica que $h_1 = 150$ m, $\rho_1 = 60$ ohm.m y que el valor h_2 se encuentra entre 300 y 450 m (ν_1 igual a 2 ó 3). Llevamos al impreso del ábaco H la curva de módulo $\mu_1 = 2/3$ y señalamos en ella la posición del punto H para $\nu_1 = 2$ y $\nu_1 = 3$. Entre estos dos puntos, H_1 y H_2 , se encuentra el punto incógnita H. El valor aproximado de su ordenada γ_H está entre 43 y 44 ohm.m. Por tanto, $\nu_H = \rho_3/\gamma_H \approx 8,3$. Según esto, para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV, utilizamos el ábaco 90 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 0$) con cuya curva hallamos $x_H = 470$ m; $\gamma_H = 44$ ohm.m; $\nu_H = 0,55$. De aquí, $h'_3 = \nu_H \cdot x_H = 260$ m para $\rho'_3 = 400$ ohm.m. Pasando, según el principio de equivalencia, a la resistividad verdadera $\rho_3 = 360$ ohm.m, tendremos $h_3 = 260 \cdot 400/360 \approx 280$ m. Es decir, que la profundidad del horizonte de apoyo es de unos 750 m.

El análisis de los resultados de la interpretación de las curvas de SEV teóricas de tipo HK demuestra lo siguiente: 1) Normalmente, los errores de cálculo de x_H y h_3 tienen signo contrario; 2) Para errores grandes de $\Delta x_H/x_H$ (hasta un 60 a 80%) el error $\Delta h_3/h_3$ también puede alcanzar valores elevados; 3) En suma, los errores $\Delta x_H/x_H$ y $\Delta h_3/h_3$, al tener signos opuestos, no originan errores importantes en la valoración de la profundidad del horizonte de apoyo ($\rho_4=0$); el error $\Delta H/H$, para h_2/h_1 y h_3/h_1 iguales, por ejemplo, a 2, no excede de ± 15 a $\pm 20\%$.

De éstos se puede concluir que la interpretación de las curvas de SEV de tipo HK, si los parámetros ρ_2 y ρ_3 están calculados exactamente, no presenta grandes errores, incluso en el caso de un error grande en el cálculo de la posición del punto H.

Si en la interpretación de las curvas de SEV de tipo HK se comete error por un conocimiento inexacto de ρ_3 , entonces el error principal en la interpretación de la curva está originado por el cálculo erróneo del espesor h_3 . Sabemos que el error $\Delta h_3/h_3$ originado por inexactitud en el cálculo del parámetro ρ_3 en la interpretación de las curvas de tres capas de tipo K se expresa por

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = - \frac{\Delta \rho_3 / \rho_3}{K_4} \%,$$

en la que K_4 es el coeficiente de error en el cálculo de ρ_3 . Por ejemplo, para un error en la valoración de ρ_3 igual a $+50\%$, al interpretar la parte derecha de la curva se introduce un error en el cálculo de h_3 que es $(\Delta h_3/h_3) \cdot 100 = -50/1,5 \approx -35\%$. Sin embargo, el error en la valoración de ρ_3 introduce también cierto error en el cálculo de h_2 al interpretar la parte izquierda de la curva de SEV y, por consiguiente, la posición del punto H también será fijada con algún error (H, punto inicial para la interpretación de la parte derecha de la curva). Por tanto, la expresión del error total en el resultado de la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV de tipo HK se puede expresar del modo siguiente, teniendo en cuenta la expresión correspondiente del error de interpretación de las curvas de SEV de tipo K;

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = - \left[\frac{x_H \cdot y_H}{h_3 K_4 \rho_3} (m + n + 0,01 mn) - \frac{f}{K_4} \right] \%,$$

en la que m y n son los errores en el cálculo de x_H e y_H y el error en el cálculo de ρ_3 .

Los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo HK relacionadas con error en el cálculo de ρ_4 (si $\rho_4 \neq 0$), pueden ser valorados aproximadamente por los gráficos que ya conocemos mediante la sustitución de h_1 y ρ_1 por x_H e y_H ; h_2 y ρ_2 por h_3 y ρ_3 ; ρ_3 por ρ_4 .

CURVAS DE SEV DE TIPO AK

Las curvas de SEV de este tipo (fig. 255) no son del todo favorables para su interpretación, en especial si las relaciones

de espesores h_2/h_1 y h_3/h_1 , son pequeñas. En este caso, las curvas de tipo AK no se distinguen por su forma de las curvas de tipo K. La interpretación de las mismas como si fueran de dicho último tipo pueden conducir a grandes errores. Para dar, aunque sea, una idea aproximada de los espesores mínimos que deben tener las capas del corte de tipo AK, para determinados valores de las resistividades, teniendo la posibilidad de poder interpretar de modo claro la correspondiente curva de SEV como de cuatro capas, se han confeccionado las siguientes tablas, apoyándose en los ábacos de curvas de tres capas de tipo K.

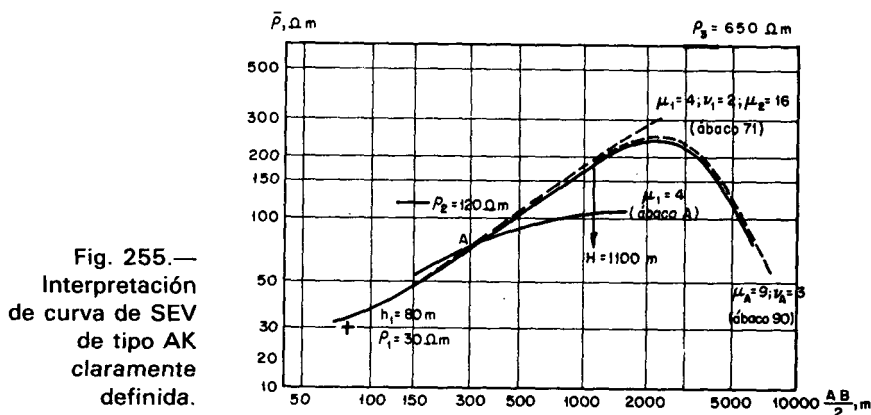


Fig. 255.— Interpretación de curva de SEV de tipo AK claramente definida.

TABLA 52

VALORES APROXIMADOS DEL ESPESOR MINIMO DE LAS CAPAS EN EL CORTE DE TIPO AK Y PROPORCIONES DE LAS RESISTIVIDADES PARAMÉTRICAS PARA QUE LA CURVA DE SEV CORRESPONDIENTE PUEDA INTERPRETARSE COMO DE CUATRO CAPAS

Relación entre las resistividades paramétricas			Relaciones mínimas entre los espesores paramétricos	
$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_3}{\rho_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$	$\frac{\rho_4}{\rho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$
1,5	2,25	0	1	4
2,3	5,30	0	1	5
4	16	0	2	7
9	81	0	3	20
19	361	0	5	60
39	1521	0	9	200

La tabla 52 pone de manifiesto que en el corte de tipo AK es necesario que, para grandes valores de ρ_2/ρ_1 , deben ser también grandes los valores de la relación h_2/h_1 y, sobre todo, h_3/h_1 , para que la curva de SEV pueda ser sometida a una interpretación cuantitativa con suficiente seguridad.

El principio de la interpretación de las curvas de SEV de tipo AK es el mismo que en el caso de las demás curvas de cuatro capas. En líneas generales, se interpreta la parte izquierda de

la curva, conocido ρ_2 , hallando mediante un ábaco de tres capas de tipo A los valores h_1 , ρ_1 , h_2 , $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\nu_1 = h_2/h_1$. Con ayuda del ábaco A, conocidos μ_1 y ν_1 , se calcula la posición del punto A (x_A , y_A) y de aquí $\mu_A = \rho_3/y_A$. Con este módulo y conocido ρ_A , aunque sea aproximadamente, se elige un ábaco de curvas de SEV de tres capas de tipo K, con cuyo auxilio se interpreta del modo habitual la parte derecha de la curva de SEV dada. Ello da $h_3 = \nu_A \cdot x_A$ que nos da también la solución del problema.

Sea, por ejemplo, la curva (fig. 255) que refleja un corte de tipo AK en el que $\rho_2 = 120$ ohm.m, $\rho_3 = 650$ ohm.m. Por el aspecto de la curva se puede tomar $\rho_A = 0$. Mediante el ábaco de dos capas, hallamos $\rho_1 = 30$ ohm.m y $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 4$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 22$. Por consiguiente, para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV se puede hacer uso del ábaco 71 ($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = 16$). Suponiendo un error ($\sim 30\%$) en la valoración de ρ_3 , ello no introduce gran error en la valoración de h_2 . Por el ábaco 71 hallamos $h_1 = 80$ m, $\rho_1 = 30$ ohm.m, $\nu_1 = 2$; por consiguiente, $h_2 = \nu_1 \cdot h_1 = 160$ m. Utilizando el ábaco auxiliar A hallamos $x_A = 290$ m, $y_A = 73$ ohm.m. De aquí, $\mu_A = \rho_3/y_A = 9$. Para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV tomamos el ábaco 90 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 0$). Esto permite calcular $\nu_A = 3$ y de aquí, $h_3 = \nu_A \cdot x_A = 870$ m. Por consiguiente, $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 1100$ m.

El ejemplo considerado corresponde a un caso favorable. Las curvas de tipo AK corresponden al corte en que $h_2/h_1 = 2$; $h_3/h_1 \approx 11$ para $\mu_1 = 4$. La profundidad del horizonte de apoyo se logra calcular aquí con suficiente exactitud.

En la figura 256 se presenta una curva de SEV de tipo AK de interpretación difícil. Pertenece a un corte en el que debajo de un paquete conductor de sedimentos superficiales se presenta una capa de relativamente escaso espesor con resistividad $\rho_2 = 80$ ohm.m, que a su vez descansa sobre otra capa de poco espesor de resistividad ρ_3 de unos 27.000 ohm.m. Como horizonte de apoyo existen en este caso rocas muy conductoras.

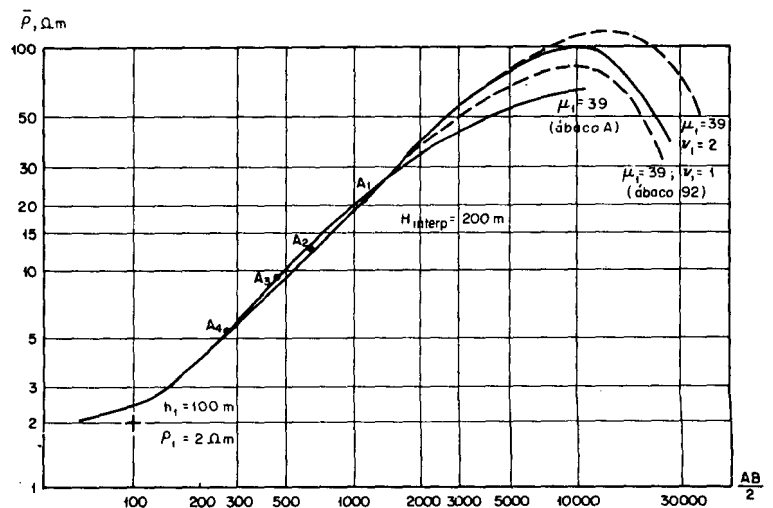


Fig. 256.—Caso difícil de interpretación de curva de SEV de tipo AK.

El ábaco de dos capas nos permite calcular $h_1 = 100$ m, $\rho_1 = 2$ ohm.m; por tanto, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 40$, $\mu_2 > 13.000$. Para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV se puede utilizar el ábaco 74 ($\mu_1 = 39$, $\mu_2 \approx 1520$), pero al superponer sobre el mismo nuestra curva se comprueba que la serie de curvas del ábaco tienen tan próximas entre sí las ramas ascendentes que no es posible elegir un valor ν_1 que corresponda exactamente a nuestra curva. A la rama ascendente de la gráfica de SEV corresponde un valor ν_1 entre $1/9$ y 3 . Por consiguiente, el valor de h_2 queda indefinido, y no es posible hallar la posición exacta del punto A para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV dada.

Si calcamos del ábaco A sobre nuestra curva la línea $\mu_1 = 39$ y señalamos en ella los puntos correspondientes a $\mu_1 = 1/9$ y $\nu_1 = 3$, hallamos un segmento de la curva A dentro de cuyos límites debe quedar situado el punto buscado A. Como vemos, dicho segmento es bastante amplio y calcular dentro de él la posición verdadero del punto A es prácticamente imposible. Utilizando el valor máximo entre los posibles, $\nu_1 = 3$, hallamos $h_2 = 300$ m. Por el ábaco A hallamos $x_A = 1100$ m, $y_A = 21$ ohm.m; $\mu_A = \rho_3/y_A = 1300$. Utilizando para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV el ábaco 92 ($\mu_1 = 39$) hallamos $\nu_A = 1,2$; de aquí, $h_3 = \nu_A \cdot x_A = 1320$ m para $\rho'_3 = \mu_1 \cdot y_A \approx 39 \cdot 21 \approx 800$ ohm.m, pero el valor verdadero es $\rho_3 = 27 \cdot 10^3$ ohm.m. Por la gráfica de la figura 73 se ve que en corte de tipo K, para el caso $\mu_1 = 39$ y $\nu_1 = 1,2$, es aplicable entre límites muy amplios el principio de equivalencia, y es factible aumentar, sin variar el aspecto de la curva de SEV, ρ_3 en cualquier número de veces disminuyendo proporcionalmente h_3 . Por consiguiente, efectuando el cálculo del espesor h_3 , por la fórmula del principio de equivalencia hallamos $h_3 = 40$ m. Es decir, que en una primera suposición tenemos $H = h_1 + h_2 + h_3 = 440$ m.

Supongamos ahora que $\nu_1 = 1$, por consiguiente, $h_2 = 100$ m. Entonces servirá como punto inicial para la interpretación de la parte derecha de la curva el punto A_2 (fig. 256): $X_{A_2} = 640$ m, $y_{A_2} = 12$ ohm.m; $\mu_{A_2} = 2300$. Utilizando el mismo ábaco 92 ($\mu_1 = 39$) tenemos $\nu_{A_2} = 3,8$ para $\mu'_A = 39$. Pero el verdadero valor de μ_{A_2} , como hemos visto, es casi 59 veces mayor que el tomado. Por la gráfica de la figura 73 se puede comprobar que es aplicable también a este caso el principio de equivalencia. Por tanto, pasando a la resistividad verdadera de la capa h_3 hallamos, después del correspondiente cálculo, $\nu_{A_2} = 3,8/59 = 0,064$. Y de aquí, $h_3 = \nu_{A_2} \cdot X_{A_2} = 41$ m; $H = 240$ m.

Suponiendo ν_1 aún menor, por ejemplo, $\nu_1 = 0,5$, hallamos $x_{A_3} = 460$, $y_{A_3} = 9$; $\mu_{A_3} = 3000$. El mismo ábaco 92 da $\nu'_{A_3} = 7,5$. También es aplicable en este caso, el principio de equivalencia. Teniendo en cuenta que μ_{A_3} es aproximadamente 77 veces mayor que μ_1 , hallamos $\nu_{A_3} = 7,5/77 = 0,097$ y, por consiguiente, $h_3 = \nu_{A_3} \cdot X_{A_3} \approx 45$ m, es decir, prácticamente el mismo que en ambos casos anteriores: $H \approx 200$ m.

Se comprende que también para ulteriores disminuciones hasta el límite para el que la posición del punto A, permite aún la interpretación de la parte derecha de la curva dada de

SEV mediante el ábaco de curvas de tres capas de tipo K, con el valor máximo del módulo μ_1 , los valores h_3 se diferencian poco entre sí. Es decir, que en casos semejantes al considerado, cuando ρ_3 es grande en comparación con ρ_2 , el error en la valoración de h_2 y, por consiguiente, también en el cálculo de la posición del punto A, prácticamente no influye en el cálculo de h_3 . El error de interpretación dependerá principalmente del error en la valoración de h_2 , que puede ser considerable.

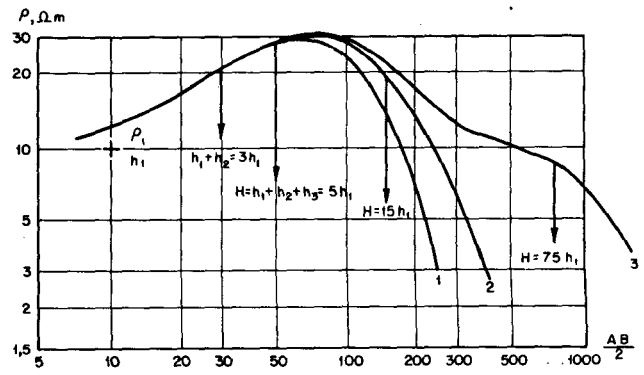
Si se considera la curva de tipo AK como de tres capas de tipo K, no teniendo en cuenta la capa h_2 , ρ_2 o h_3 , ρ_3 , entonces se introducen errores en el resultado de la interpretación, que vienen fijados por las expresiones (75) o (76). El error será de signo negativo si se prescinde de la capa segunda (h_2 , ρ_2) y positivo si se prescinde de la tercera.

Los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo AK relacionados con errores en la valoración de ρ_2 , ρ_3 y ρ_4 , se determinan del mismo modo que en el caso de la interpretación de las curvas de SEV de los tipos A y K.

CURVAS DE SEV DEL TIPO KQ

Las curvas de SEV de tipo KQ también forman parte de las que se interpretan difícilmente. En la práctica lo más frecuente es que no se pueda identificar en la rama derecha descendente de la curva la presencia de la tercera capa. La curva puede tener el aspecto de una de tres capas de tipo K, incluso para valores relativamente grandes de h_2/h_1 y h_3/h_1 . En la figura 257 se muestra un ejemplo de tres curvas calculadas 1, 2, 3 de tipo KQ para idénticos valores de $\rho_2/\rho_1=9$, $\rho_3/\rho_1=1$, $\rho_4=0$, $h_2/h_1=2$ y diferentes h_3/h_2 iguales a 2, 12 y 72, respectivamente. Para $h_3/h_1=2$ y $h_3/h_1=12$ ($h_3/h_2=6$) las curvas de SEV tienen aspecto de curvas de tres capas. El tercer horizonte se refleja tan sólo de modo claro en la rama descendente de la curva para $h_3/h_1=72$ ($h_3/h_2=36$). De las curvas de SEV de tipo KQ sólo las que tienen un aspecto análogo a la curva 3 de la figura pueden ser interpretadas cuantitativamente con suficiente exactitud.

Fig. 257.—Curvas de SEV de tipo KQ correspondientes a cortes con diferentes h_3 ;
 $\rho_2 = 9 \rho_1$;
 $\rho_3 = \rho_1$;
 $\rho_4 = 0$.



La interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo K sirve como base para la reducción de las curvas de cuatro capas a otras de tres capas. La interpretación de la parte izquierda de la curva de tipo KQ con ayuda de los ábacos de dos y tres capas de tipo K permite calcular h_1 , ρ_1 y h_2 conocidos ρ_2 y ρ_3 . Haciendo uso del ábaco auxiliar K se calcula la posición de la línea μ_1 y del punto K (x_K , y_K) en ella. A continuación se calcula $\mu_K = \rho_3/y_K$, ρ_4/y_K y con ayuda del ábaco de tres capas de tipo Q correspondiente a estos módulos se interpreta la parte derecha de la curva que tiene su origen en el punto K. Mediante el ábaco se concreta el valor ν_K que permite calcular $h_3 = \nu_K \cdot x_K$.

Sea, por ejemplo, la curva de SEV de la figura 258 perteneciente a un corte de cuatro capas de tipo KQ en el que $\rho_2 = 140$ ohm.m, $\rho_3 = 15$ ohm.m. Se calcula mediante el ábaco de dos capas de modo aproximado que $\rho_1 = 15$ ohm.m, hallándose a continuación $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 \approx 9,3$; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 1$. Para la interpretación de la parte izquierda de la curva se puede tomar el ábaco 60 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 1$). Hallamos $h_1 = 50$ m, $\rho_1 = 15$ ohm.m, $\nu_1 = 2$; $h_2 = \nu_1 \cdot h_1 = 100$ m. Con ayuda del ábaco K y para los valores hallados de μ_1 y ν_1 calculamos la posición del punto K: $x_K = 320$ m, $y_K = 58$ ohm.m. De aquí, $\mu_K = \rho_3/y_K \approx 1/4$. Por la marcha de la rama final de la curva de SEV dada se puede admitir que $\rho_4 = 0$. Por consiguiente, para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV debemos tomar el ábaco de tres capas 77 de tipo Q ($\mu_1 = 1/4$, $\mu_2 = 0$). La coincidencia óptima con la parte de la curva que se interpreta se consigue con la curva del ábaco con módulo $\nu_1 = \nu_K = 2$. Por consiguiente, $h_3 = \nu_K \cdot x_K = 640$ m. La profundidad del horizonte de apoyo será $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 800$ m.

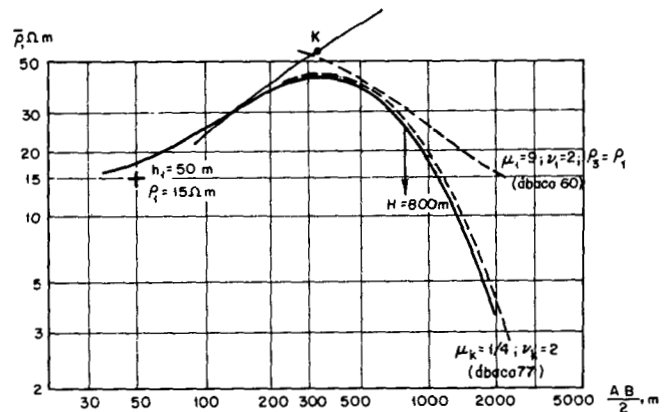


Fig. 258.— Interpretación de curvas de SEV de tipo KQ.

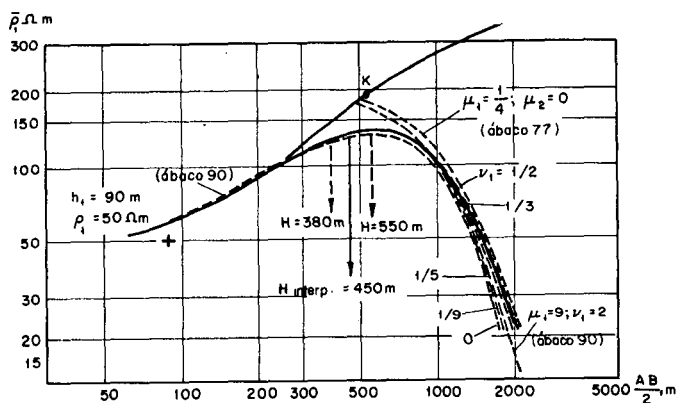
La curva considerada de SEV que refleja un corte en que h_3 es grande en comparación con h_2 ($h_3/h_2 \approx 6$) se interpreta con suficiente exactitud. El error en este caso no supera +8%.

La investigación de los resultados de la interpretación de curvas de SEV calculadas de tipo KQ, para valores pequeños de h_2/h_1 y h_3/h_1 demuestra que aún en caso de ser exactamente conocidos los parámetros ρ_2 y ρ_3 , la interpretación de las curvas como de cuatro capas es

imposible o el error de interpretación puede ser de 30 a 50% y aún más. Este error proviene de que la rama derecha descendente de la curva de SEV, para espesores de las capas pequeñas, reflejan un corte con una relación $\nu_K = h_3/x_K$ muy pequeña, por lo que su cálculo es imposible en virtud de la concentración de las curvas del ábaco de tipo Q en la zona de los valores ν_1 pequeños.

Por ejemplo, no es calculable el resultado de la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV del corte de tipo KQ (fig. 259) en el que $\rho_2 = 450 \text{ ohm.m}$, $\rho_3 = 50 \text{ ohm.m}$, $\rho_4 = 0$. En este caso es imposible deducir del ábaco el valor exacto de ν_K , mediante la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV. La interpretación de la parte izquierda de la curva da $h_1 = 90 \text{ m}$; $\rho_1 = 50 \text{ ohm.m}$; $h_2 = 180 \text{ m}$, $x_K = 550 \text{ m}$, $y_K = 190 \text{ ohm.m}$; $\mu_K = \rho_3/y_K \approx 1/4$. Utilizando el ábaco 77 para la interpretación de la parte derecha de la curva, se puede tomar cualquier valor de ν_K desde $1/5$ hasta $1/2$ y de aquí que los valores obtenidos de h_3 pueden variar entre 110 y 280 m . La profundidad del horizonte de apoyo, por consiguiente, se calcula en este caso muy inexactamente.

Fig. 259.—
Ejemplo de curva
de SEV de tipo
K Q que produce
un resultado de
interpretación
indeterminado.



En la tabla 53 se dan los valores aproximados de estos mínimos de la relación h_3/x_K en el corte de tipo KQ para diferentes ρ_3/y_K y ρ_4/ρ_1 igual a 0 o a $\sqrt{\rho_3/y_K}$ que permiten interpretar la curva de SEV de tipo KQ con exactitud admisible (error hasta ± 10 a $\pm 15\%$) para valores conocidos de los parámetros ρ_2 y ρ_3 del corte.

TABLA 53

VALORES MINIMOS APROXIMADOS DE ρ_3/y_K PARA DIFERENTES ρ_3/y_K QUE PERMITEN LA POSIBILIDAD DE UNA INTERPRETACION SUFICIENTEMENTE EXACTA DE LAS CURVAS DE SEV DE TIPO KQ ($\rho_4 = 0$, $\rho_4 = \sqrt{\rho_3/y_K}$) PARA VALORES CONOCIDOS DE ρ_2 Y ρ_3

ρ_3/y_K	mínimo de h_3/x_K
1/39	3
1/9	2
1/19	2
1/4	1
3/7	1
2/3	1

La tabla 53, deducida del examen de los ábacos de curvas de SEV de tres capas de tipo Q, demuestra que cuanto menor es el valor de ρ_3/γ_K tanto mayor debe ser h_3/x_K para que, a igualdad de las restantes condiciones, se pueda interpretar la curva con suficiente seguridad.

Antes nos hemos detenido en los errores de interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas de tipo KQ al interpretarlas como de tres o incluso dos capas. Las fórmulas (75), (76) y (77') dan el valor cuantitativo de estos errores en función de los parámetros del corte, en caso de ignorar en la interpretación una u otras capas o ambas simultáneamente.

Por ejemplo, la curva de la figura 259 se puede tomar perfectamente por una de tres capas de tipo K. Interpretándola con ayuda del ábaco 90 ($\mu_1=9$, $\mu_2=0$) despreciando la capa h_3 , ρ_3 hallamos $h_1=90$ m, $\nu_1=2,2$ y $h_2=200$ m. De aquí, $H=290$ m. En realidad, el corte en dicho punto de investigación es tal que $\rho_2=450$ ohm.m, $\rho_3=50$ ohm.m, $\rho_4=0$; $h_1=90$ m, $h_2=180$ m, $h_4=\infty$ y, por consiguiente, $H=450$ m. El error de interpretación es, por tanto $(\Delta H/H)100=-36\%$.

Si calculamos el error por la fórmula (75) llegamos al mismo resultado.

Hay que hacer constar que en caso de valores pequeños de h_3 cuando no es posible interpretar la curva de tipo KQ sin gran error como de cuatro capas, es preferible interpretarla como de tres capas de tipo K. Como este error se obtiene de modo invariable con signo negativo, se disminuye en ambos casos la profundidad del horizonte de apoyo. Para parámetros del corte prácticamente constantes, estos errores varían poco en magnitud absoluta y, por consiguiente, la amplitud de variación ligada a ellos de la cota del horizonte de apoyo será insignificante. Por tanto, la interpretación de tales curvas de SEV como de cuatro capas puede llevar consigo errores variables de consideración que tergiversen el resultado de la exploración.

Los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo KQ ligados a una valoración inexacta de los parámetros iniciales están subordinados a las mismas leyes que los correspondientes a la interpretación de las curvas de SEV de tipo K y Q.

CURVAS DE SEV DE TIPO QQ

Las curvas de SEV de este tipo reflejan los cortes eléctricos de cuatro capas en que la resistividad disminuye de la capa superior a la inferior. Una interpretación más o menos segura de las curvas de SEV de tipo QQ sólo es posible en caso de valores h_2/h_1 y h_3/h_1 relativamente grandes y suficientemente amplia diferencia entre las resistividades de las capas. En caso de no cumplirse estas condiciones, las curvas de SEV

de tipo QQ, de modo semejante a lo que ocurre con las curvas de SEV de tipo AA, tienen un carácter monótono y por su aspecto no pueden diferenciarse de las curvas de tres capas de tipo Q e incluso de las curvas de dos capas. La interpretación de tales curvas, que en realidad corresponden a un corte de cuatro capas, lleva consigo errores de consideración.

El método de interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de tipo QQ está basado en los mismos principios que en el caso de los restantes tipos de curvas de cuatro capas.

La curva dada, con ayuda del ábaco auxiliar (en este caso, del ábaco Q), se reduce a una curva de tres capas de tipo Q que a continuación se interpreta por el método conocido para este tipo de curvas. La marcha de la interpretación de las curvas de SEV de tipo QQ se puede exponer del siguiente modo. Con ayuda del ábaco de dos capas se calculan para la rama inicial izquierda de la curva h_1 y ρ_1 . Esto permite, conocidos de antemano ρ_2 y ρ_3 , valorar μ_1 y μ_2 que a su vez permiten escoger el ábaco necesario (calculado o hallado gráficamente) para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV. Calculado con ayuda de este ábaco $\nu_1 = h_2/h_1$ y conocidos h_1 y ρ_1 se calcula $h_2 = \nu_1 \cdot h_1$.

A continuación, conocidos μ_1 y ν_1 se transfiere del ábaco auxiliar Q al impreso de SEV la curva μ_1 y el punto Q situado en ella; las coordenadas de este punto (x_0 , y_0) indican el espesor y la resistividad de cierta capa que equivale al conjunto de las dos primeras del corte. Se calculan los valores x_0 , y_0 y $\mu_0 = \rho_3/y_0$. Mediante el valor μ_0 hallado y el de ρ_4 , estimado de modo aproximado por la marcha de la parte final de la curva, se elige un ábaco de curvas de tres capas de tipo Q para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV. Este ábaco permite calcular ν_0 y, por consiguiente, $h_3 = \nu_0 \cdot x_0$.

En la figura 260 se tiene una curva de SEV de tipo QQ suficientemente favorable para su interpretación cuantitativa. Corresponde a un corte en que $\rho_2 = 100$ ohm.m, $\rho_3 = 45$ ohm.m y $\rho_4 = 0$. Veamos su interpretación.

Con ayuda del ábaco de dos capas, calculamos $h_1 = 80$ m, $\rho_1 = 600$ ohm.m. De aquí que $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1/6$; $\mu_2 = \rho_3/\rho_1 = 1/13$. Dado que en la colección de ábacos calculados no se tiene una curva que corresponda a este módulo, construimos el ábaco exigido gráficamente y con ayuda hallamos $\nu_1 = 3$. Teniendo en cuenta que permanecen fijos h_1 y ρ_1 hallamos $h_2 = \nu_1 \cdot h_1 = 240$ m.

Haciendo uso del ábaco auxiliar Q hallamos la posición del punto Q: $x_0 = 260$ m, $y_0 = 112$ ohm.m, $\mu_0 = \rho_3/y_0 = 1/2,5$. Para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV dada utilizamos el ábaco 76 de módulo contiguo a los dados $\mu_1 = 3/7$ y $\mu_2 = 0$. Con su ayuda obtenemos $\nu_0 = 4,2$ y $h_3 = \nu_0 \cdot x_0 = 1100$ m. Por consiguiente, $H = h_1 + h_2 + h_3 = 1400$ m.

Como pone de manifiesto el examen de las curvas de SEV calculadas de tipo QQ, el error de interpretación para una

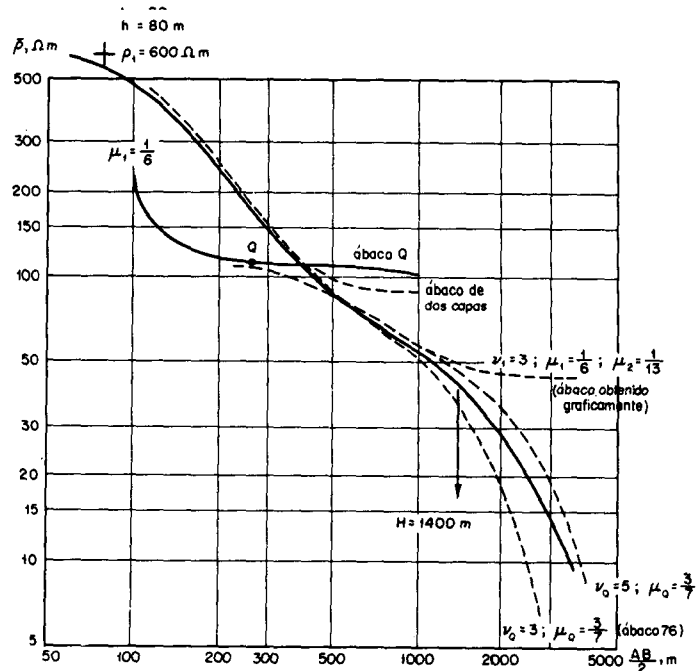


Fig. 260.— Interpretación de curvas de SEV de tipo Q Q.

valoración exacta de los parámetros ρ_2 y ρ_3 en curva de este tipo claramente expresadas y con mediciones de campo de buena calidad, no excede de ± 10 a $\pm 15\%$.

El examen de las curvas de SEV de tres capas teóricas de tipo Q permite indicar aproximadamente, para diferentes ρ_2/ρ_1 y ρ_3/ρ_1 ($\rho_4 = 0$), el valor mínimo de h_2/h_1 y h_3/h_1 en el corte de tipo QQ que permite efectuar una interpretación satisfactoria (tabla 54).

TABLA 54

VALORES MINIMOS APROXIMADOS DE h_2/h_1 Y h_3/h_1 EN EL CORTE DE TIPO QQ ($\rho_4 = 0$) PARA LOS QUE ES POSIBLE LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV DE ESTE TIPO COMO DE CUATRO CAPAS

ρ_2/ρ_1	ρ_3/ρ_1	ρ_4	Relaciones mínimas de los parámetros	
			h_2/h_1	h_3/h_1
1/39	1/39	0	3	18
	1/19-1/9			12
	1/4 -2/3			6
1/19	1/39	0	2	13
	1/19-1/4			9
	1/4 -2/3			4
1/19	1/39	0	2	14
	1/19-1/9			9
	1/4 -2/3			5
1/4-2/3	1/39	0	1	11
	1/19-1/9			8
	1/4 -2/3			4

Como vemos, es conveniente que el valor de h_3/h_1 , en el corte de tipo QQ sea bastante grande, especialmente para valores de ρ_2/ρ_1 y ρ_3/γ_0 pequeños, para que estas curvas de tipo QQ puedan interpretarse con exactitud suficiente.

Por ejemplo, es imposible interpretar como de cuatro capas la curva de SEV de tipo QQ de la figura 261. Pertenece a un corte en que $h_1=100$ m, $\rho_1=650$ ohm.m, $h_2=500$ m, $\rho_2=35$ ohm.m, $h_3=300$ m, $\rho_3=1$ ohm.m, $\rho_4=0$ ($\rho_2/\rho_1 \approx 1/19$, $\rho_3/\gamma_0 = 1/36$, $h_2/h_1 = h_3/h_1 = 3$). La interpretación de la parte derecha de la curva de SEV da un resultado totalmente indeterminado. Sin embargo, dicha curva coincide satisfactoriamente con la curva de tipo Q de módulo $\nu_1=5$ del ábaco 67 [$\mu_1 = 1/19$, $\mu_2 = (\rho_2/\rho_1)^2$]. El resultado de esta interpretación errónea es $H=h_1+h_2=600$ m. Por consiguiente, el error es de un -33% . Dicha cifra coincide con el error calculado por la fórmula (75).

La proporción entre los parámetros en el corte dado es tal que la tercera capa, de espesor considerable, no se refleja en la curva de SEV. La tabla 54 pone de manifiesto que la relación h_3/h_1 en el caso considerado debería ser al menos igual a 18 para que la curva de SEV pudiera interpretarse como de cuatro capas.

Las curvas de SEV de tipo QQ interpretadas como de tres capas de tipo Q, despreciando la segunda capa superior, dan una profundidad exagerada H como se ve por la fórmula (76). En cuanto a su interpretación como curva de dos capas implica un error considerable de signo negativo, [fórmula (77)].

En caso de error de interpretación de las curvas de SEV de tipo QQ relacionado con error de cálculo de los parámetros iniciales del corte, se tienen las mismas expresiones que para

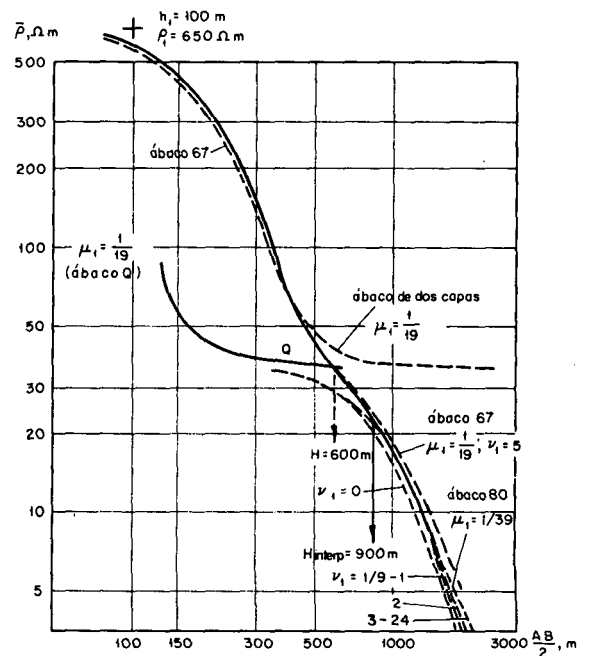


Fig. 261.—Curva de tipo QQ que sólo se puede interpretar como curva de tres capas de tipo Q.

el caso de errores de interpretación en las curvas de SEV de tipo Q. Dicho error puede calcularse por la interpretación separada de las partes izquierda y derecha de la curva de SEV.

36. Breves conclusiones sobre la metodología de interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas

Hemos examinado los métodos de interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de cuatro capas de todos los posibles tipos. Resumamos los resultados.

1.—Para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de cuatro capas deben conocerse, como regla general, las resistividades ρ_2 y ρ_3 . Aunque sea de modo aproximado, debe también valorarse ρ_4 , si es que no es a efectos prácticos, infinitamente grande o pequeña. Las resistividades paramétricas se calculan: a) Por los datos de testificación y por las curvas de SEV próximas a sondeos mecánicos; b) Por las curvas de SEV en las que no es aplicable el principio de equivalencia; c) En virtud de estudios concluyentes de los materiales de SEV de la zona con intervención de toda la información existente de la región estudiada y contiguas. Si ello es posible, se calculan también las resistividades mediante mediciones eléctricas en los afloramientos existentes de las capas del corte que se estudia.

Si no se tienen suficientes datos de sondeos mecánicos y restantes indicaciones para una valoración clara de las resistividades, éstas se tomarán condicionalmente. Sea como sea, al comenzar la interpretación cuantitativa del material de SEV para la zona estudiada, el interpretador debe tener una idea de las resistividades paramétricas de las capas en todos los puntos de SEV.

2.—En la interpretación de las curvas de SEV de cuatro capas normalmente se examinan las partes izquierda y derecha, que se consideran como curvas de tres capas individuales. Para ello, se toma como origen de la primera curva de SEV el punto de coordenadas h_1 y ρ_1 , y como origen de la segunda uno de los puntos auxiliares H, A, K o Q, cuyas coordenadas x e y son el espesor y la resistividad de una capa equivalente al conjunto de las dos primeras capas del corte. La interpretación de la parte izquierda de la curva de cuatro capas, con ayuda de los ábacos de dos y tres capas del tipo correspondiente a esta parte de la curva de SEV permite calcular h_1 , ρ_1 , h_2 , $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ y $\nu_1 = h_2/h_1$. Partiendo de los valores μ_1 y ν_1 se calcula la posición (x, y) del origen de la segunda curva de SEV de tres capas (parte derecha de la gráfica de SEV dada). Los valores ρ_3/y y ρ_4/y , permiten hallar el ábaco de tres capas que hace posible la interpretación de la segunda curva de SEV de tres capas (insistimos sobre la necesidad de hacer una utilización amplia de los ábacos contruidos por medios gráficos si en la colección de curvas de SEV de tres capas calculadas no existe el ábaco necesario para la interpretación de la parte izquierda o derecha de la curva dada).

La interpretación de la parte derecha de la curva de SEV de cuatro capas fija el valor $\nu = h_3/x$ y, por consiguiente, el de

h_3 , lo que soluciona el problema de la interpretación cuantitativa de la curva.

Los errores de la interpretación que surgen a causa de los errores en la valoración de los parámetros iniciales, se calculan en general mediante las expresiones halladas en el estudio de las curvas de SEV de tres capas.

3.—Si en el corte estudiado $\rho_4 = \infty$, lo más sencillo es basar la interpretación de las curvas de SEV en el valor de la conductancia longitudinal total obtenida del impreso de cada curva de SEV. Para ello, con ayuda de los ábacos se interpreta solamente la parte izquierda de la curva de SEV obteniéndose los valores h_1 , ρ_1 y h_2 . El espesor h_3 se calcula sencillamente por la fórmula: $h_3 = S_3 \cdot \rho_3 = [S - (S_1 + S_2)] \rho_3$.

Los errores de interpretación relacionados con error en el cálculo de S y de otros parámetros iniciales del corte, se pueden valorar por las fórmulas correspondientes.

Para $\rho_4 = \infty$, la profundidad H del horizonte de apoyo se puede calcular también mediante la resistividad media longitudinal del corte ρ_r . Si puede obtenerse ésta se sabe que permanece suficientemente constante o varía de un modo regular dentro de la zona investigada.

4.—Las curvas de SEV de los tipos KH y QH son las más favorables para su interpretación. Para un corte eléctrico bien diferenciado, con cálculo exacto de los parámetros de resistividad y calidad adecuada de las mediciones de campo, los valores obtenidos en la interpretación de las curvas de SEV de estos tipos tienen un error que no excede de ± 10 a $\pm 15\%$. En cuanto a errores de interpretación originados por error en la valoración de los parámetros iniciales se pueden calcular aproximadamente mediante las fórmulas correspondientes ya citadas.

Si en el corte de tipo KH y QH es $h_3/h_2 \geq 10$ (mínimo de las curvas de SEV amplio) la profundidad del horizonte de apoyo se puede calcular con ayuda del ábaco de dos capas partiendo del valor $\bar{\rho}_{min}$. El error de interpretación, que en este caso tiene siempre signo positivo, no sobrepasa de $\pm 10\%$. En este caso, por consiguiente, pueden ser desconocidos los parámetros ρ_2 y ρ_3 . Para las curvas de SEV de tipo KH con mínimo de $\bar{\rho}$ confusamente expresado, estas gráficas deben interpretarse haciendo uso del punto A.

La interpretación de las curvas de SEV de los tipos KH y QH como de tres capas, menospreciando la segunda (h_2 , ρ_2) lleva a errores de signo negativo en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo y en caso de ser la tercera capa (h_3 , ρ_3) la que no se tiene en cuenta, los errores serán de signo positivo.

5.—Si en los cortes representados por curvas de SEV de los tipos KH y QH la resistividad del horizonte de apoyo no es infinitamente grande ($\rho_4 \neq \infty$) y se logra en la región explorada establecer (mediante datos de sondeos mecánicos o exploración sísmica) una relación suficientemente clara entre

la variación del ángulo de inclinación α de la rama final de las curvas de SEV con el eje de abscisas y una resistividad media ρ_t del corte, entonces puede calcularse de modo sencillo la profundidad del horizonte de apoyo como la abscisa del punto de intersección de la recta $\bar{\rho} = \rho_t$ con la prolongación de la rama final de la curva de SEV inclinada el citado ángulo α con el eje de distancias AB.

6.—Las curvas de SEV de tipo HA generalmente no son favorables para la interpretación. Dicha interpretación, aún partiendo de un cálculo exacto de los parámetros, suele llevar a grandes errores en la valoración de la profundidad del horizonte de apoyo, ligados principalmente al error en la valoración de h_3 al interpretar la rama final monótona de la curva de SEV y ser $\rho_4 \neq \infty$.

Las gráficas de SEV de tipo HA, que por su aspecto se asemejan a curvas de tipo H, con frecuencia se interpretan como de tres capas con menosprecio de la capa h_3 , ρ_3 . Con ello surgen errores de signo negativo que se calculan por la fórmula correspondiente. Estos errores suelen ser bastante constantes en magnitud absoluta, siempre que la proporción entre los parámetros del corte se mantengan prácticamente invariable. No se observa esta constancia en el error al interpretar la curva de SEV de tipo HA como de cuatro capas.

7.—Las curvas de SEV de tipo AA son aún más desfavorables para su interpretación. Los errores en el cálculo del espesor h_3 para una valoración exacta de los parámetros iniciales del corte si $\rho_4 \neq \infty$, puede llegar a $\pm 50\%$ y más, aún en el caso de ser $\rho_3/\gamma_H \leq 10$.

Con bastante frecuencia, las curvas de SEV de este tipo se toman como curvas de tres capas de tipo A e incluso como curvas de dos capas. Los errores de interpretación de las curvas de SEV de tipo AA al suponer que son de tres o dos capas tienen signo negativo.

8.—Las curvas de SEV de cuatro capas correspondientes a los cortes en que $\rho_4 < \rho_3$ se interpretan en general con menos exactitud que las curvas de SEV del primer grupo, para las que se puede utilizar en su interpretación el valor exacto o incluso aunque sea aproximadamente, el valor calculado de S.

Son, sobre todo, favorables para su interpretación las curvas de SEV de cuatro capas del segundo grupo, de tipo HK. Si las mismas están suficientemente bien definidas, entonces para una calidad adecuada de las medidas de campo y un cálculo exacto de los parámetros iniciales del corte, el error de interpretación no excede de ± 10 a $\pm 15\%$.

Para valores relativamente grandes de h_2/h_1 , se puede prescindir en el corte de tipo HK ($h_2/h_1 \geq 10$) de la parte izquierda de la curva de SEV e interpretar sólo la derecha con ayuda de los ábacos de tres capas. En este caso, sólo se necesita conocer el valor del parámetro ρ_3 .

Si ρ_3/ρ_2 es pequeño (por ejemplo, $\rho_3/\rho_2 = 1,5$) entonces para relativamente grandes h_2/h_1 o h_3/h_1 (iguales o mayores que

12) en que la parte central de la curva de SEV es aparentemente una recta horizontal, se puede interpretar la curva de SEV de tipo HK con ayuda del ábaco de dos capas, depreciando su parte izquierda. En este caso, por tanto, no es necesario conocer el valor de los parámetros ρ_2 y ρ_3 .

En caso de estar confusamente expresada la capa h_3, ρ_3 , las curvas de SEV de tipo HK se pueden asimilar a una de las tres capas de tipo Q. Al interpretarla como de tres capas se obtiene una profundidad del horizonte de apoyo exagerada.

9.—Las curvas de SEV de tipo AK son menos favorables para la interpretación que las de tipo HK. Sólo en caso de valores grandes de h_2/h_1 y, sobre todo, de h_3/h_1 , es posible interpretar estas curvas con exactitud suficiente. Con frecuencia, las curvas de SEV de tipo AK no se diferencian aparentemente de las gráficas de SEV de tres capas de tipo K. Al interpretarlas como de tres capas se obtienen valores de la profundidad del horizonte de apoyo conductor menores que el verdadero si despreciamos la capa h_2, ρ_2 y mayor que el verdadero si se ignora la capa h_3, ρ_3 . Hay casos en que las curvas de SEV de tipo AK tienen aspecto de curva de dos capas. Su interpretación con ayuda del ábaco de dos capas introduce errores de signo positivo, que se pueden valorar mediante las fórmulas conocidas, en la profundidad del horizonte de apoyo.

10.—Las curvas de SEV de tipo KQ son generalmente desfavorables para su interpretación. Las mismas, aún en caso de cálculo exacto de los parámetros iniciales del corte puede conducir a grandes errores debido a que la capa h_3, ρ_3 , sobre todo, para espesor relativo de la misma pequeño, queda señalada de modo impreciso en la rama descendente final de la curva. Las gráficas de SEV del tipo indicado se pueden interpretar a menudo como curvas de tres capas de tipo K, depreciando la capa h_3, ρ_3 . Con ello, en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo conductor se introducen errores de signo negativo, cuya magnitud también puede valorarse por las fórmulas citadas.

11.—Las curvas de SEV de tipo QQ son las más desfavorables para su cálculo, entre todas las curvas de SEV de cuatro capas del segundo grupo. Lo más frecuente es que en las curvas de SEV pertenecientes a cortes de este tipo no se señale claramente el horizonte h_3, ρ_3 y se consideren como curvas de tres capas de tipo Q. Esto lleva a la obtención de valores de la profundidad del horizonte de apoyo inferiores a los verdaderos. En caso de interpretar las curvas de este tipo QQ como de dos capas, si no se reflejan ambos horizontes intermedios en la curva, el error también tiene el mismo signo que en el caso anterior.

Si se desprecia en la interpretación de las curvas de SEV de tipo QQ la capa h_2, ρ_2 , el error de interpretación es de signo positivo.

4

INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV EN EL CASO DE CORTE ELECTRICO DE CAPAS MULTIPLES

37. Curvas teóricas de SEV en los cortes de capas múltiples para $\rho_{hs} = \infty$ e interpretación cuantitativa de las mismas

Se conocen habitualmente como de capas múltiples los cortes eléctricos que constan de más de cuatro capas con resistividades diferentes. Para tales cortes no existen ábacos de curvas de SEV. Tan sólo disponemos de algunas curvas de SEV de capas múltiples calculadas para casos especiales.

Ya se han indicado anteriormente que para el corte eléctrico de cinco capas se pueden observar curvas de SEV de 16 tipos diferentes en función de las posibles proporciones entre las resistividades de sus capas, para el caso de seis capas, 32 tipos, etc. No nos detendremos en el estudio de métodos de interpretación de las curvas de SEV de todos estos tipos, ya que no existen métodos especiales para ello. Las curvas de SEV de capas múltiples se procuran asimilar a curvas de cuatro capas, interpretándolas entonces por los métodos ya expuestos. Tan sólo en algunos casos de cortes de cinco y seis capas, cuando todas ellas se reflejan de un modo suficientemente claro en la correspondiente curva de SEV (por ejemplo en cortes de tipo HKH, KQH, KHK, KHKH, HKHK) se suelen interpretar como de cinco o seis capas. Las reglas para esta interpretación son las mismas que para el caso de curvas de SEV de cuatro capas. Utilizando los ábacos de curvas de tres capas y los ábacos auxiliares H, A, K y Q, en el caso de la interpretación de curvas de SEV de capas múltiples se calculan sucesivamente los espesores de las capas del corte en que se conocen las resistividades paramétricas.

Sin embargo, lo más frecuente es que las curvas del corte examinado de capas múltiples no reflejen todas sus capas. Ya hemos visto por ejemplo, curvas calculadas de SEV correspondientes a cortes de siete capas (fig. 221). Los parámetros en este caso eran los siguientes:

$$h_1 = 1; h_2 = 2; h_3 = 4; h_4 = 8; h_5 = 16; h_6 = 32; h_7 = \infty;$$

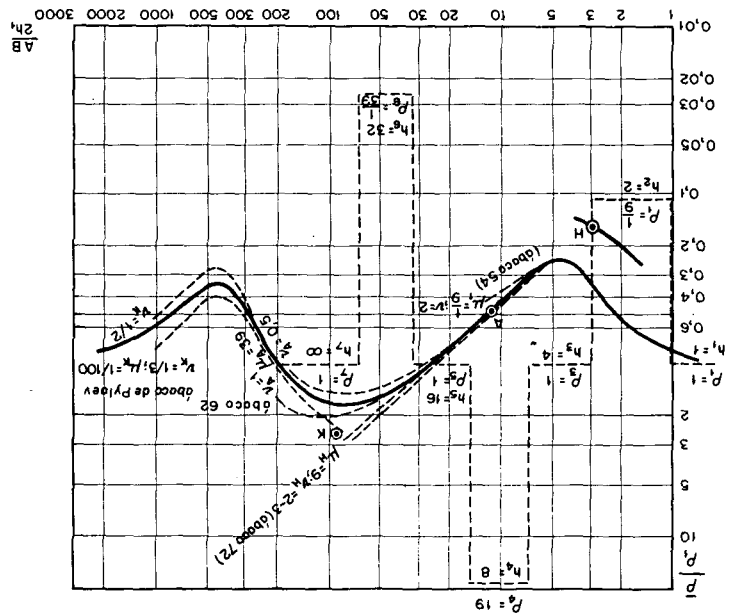
$$\rho_1 = 1; \rho_2 = \frac{1}{9}; \rho_3 = 1; \rho_4 = 19; \rho_5 = 1; \rho_6 = \frac{1}{39}; \rho_7 = 1.$$

En este corte, como veremos, el espesor se duplica de una capa a la siguiente y el valor de la resistividad de las diferentes capas es bastante variable. Sin embargo la curva de SEV tiene un claro aspecto de curva de cinco capas. Las capas 3 y 4 ($\rho_3 = 1$ y $\rho_4 = 19$) aparentan ser una sola capa de resistividad elevada, mientras que las capas 5 y 6 ($\rho_5 = 1$, $\rho_6 = 1/39$) aparentan ser una sola capa conductora. Interpretando esta curva como de cinco capas evidentemente cometemos un error en el cálculo de la profundidad del horizonte de apoyo.

Si previamente a la interpretación cuantitativa de la curva de SEV dada se sabe que la misma corresponde a un corte de siete capas y se conocen las resistividades $\rho_2 - \rho_6$, entonces puede interpretarse con cierto grado de aproximación como de siete capas. Analicemos la marcha de esta interpretación.

Interpretamos la parte izquierda de la curva (fig. 262) con ayuda del ábaco 54 ($\mu_1 = 1/9, \mu_2 = 1$), obteniendo $h_1 = 1, \rho_1 = 1, h_2 = 2$. De aquí, mediante el ábaco auxiliar H hallamos $x_H = 3, y_H = 0,16$.

Fig. 262.—
Ejemplo de interpretación de curva de SEV de siete capas.
 $h_1 = 1; h_2 = 2; h_3 = 4;$
 $h_4 = 8; h_5 = 16;$
 $h_6 = 32; h_7 = \infty$
 $\rho_1 = 1; \rho_2 = 1/9;$
 $\rho_3 = 1; \rho_4 = 19; \rho_5 = 1;$
 $\rho_6 = 1/39; \rho_7 = 1.$



Ahora en lugar de la curva de SEV dada de siete capas de tipo HAKQH tenemos que considerar la curva de SEV de seis capas de tipo AKQH:

$$\mu_H = \rho_3 / y_H = 1 / 0,16 = 6,2 \quad \rho_4 / y_H = 19 / 0,16 \approx 119.$$

Para la interpretación de su rama izquierda, que aparece como una curva de SEV de tres capas de tipo A, tomamos un ábaco de módulos μ_1 y μ_2 contiguos al hallado, teniendo en cuenta que en este caso es aplicable el principio de equivalencia en S. Este será el ábaco 72 ($\mu_1 = 9, \mu_2 = 81$). Superponiendo nuestra curva de SEV al ábaco, de forma que su origen de coordenadas coincida con el punto H señalado, obtenemos de modo aproximado que v_H está entre los valores 2 y 3. Tomamos $v'_H = 2,5$ (para $\mu'_H = 9$).

El valor verdadero de $\mu_H = 6,2$. Calculamos por tanto, por la fórmula del principio de equivalencia $v_H = v'_H \cdot \frac{6,2}{9} = 1,7$, de donde obtenemos $h_3 = x_H \cdot v_H \approx 5$.

Hallamos la posición del punto A por $\mu_H = 6,2$ y $v_H = 1,7 \cdot x_A = 11,5; y_A = 0,46$. De aquí que nuestra curva de

SEV pueda asimilarse a una curva de cinco capas de tipo KQH. Para su rama izquierda $\mu_A = \rho_A / \gamma_A = 19 / 0,46 \approx 41$; $\rho_5 / \gamma_A = 1 / 0,46 \approx 2,2$.

Tomando para su interpretación de la rama izquierda de la curva de SEV de tipo KQH el ábaco 62 ($\mu_1 = 39$, $\mu_2 = 1$), hallamos $\nu'_A = 0,75$. El cálculo mediante el principio de

equivalencia nos da el valor $\nu_A = \nu'_A \cdot \frac{39}{41} = 0,71$. De aquí se obtiene

$$h_A = x_A \cdot \nu_A = 8,2.$$

Por los valores $\mu_A = 41$, $\nu_A = 0,71$ calculamos la posición del punto K:

$$x_K = 90$$

$$y_K = 2,5.$$

Ahora la curva de SEV dada de siete capas queda reducida a una de cuatro capas de tipo QH. Esta curva refleja un corte en que el espesor de la primera capa ficticia es igual a 90 y su resistividad 2,5; h_2 (h_5) = 16; ρ_2 (ρ_5) = 1; h_3 (h_6) y ρ_3 (ρ_6) = 32 m, y 1/39 ohm.m respectivamente. A continuación hallamos $\mu_K = \rho_5 / \gamma_K = 1 / 2,5$; $\rho_6 / \gamma_K = 1 / 97$.

La parte última de la curva de SEV dada no es posible interpretarla como una curva de cuatro capas de tipo QH: La rama descendente de la misma corta a las curvas de tres capas de los ábacos de tipo Q (por ejemplo ábaco 76). Esta parte de la curva tan sólo puede considerarse como una curva de SEV de tres capas de tipo H. Sin embargo, sabemos que el horizonte conductor está constituido en este caso por dos capas cuyas resistividades conocemos. En tal caso y basándonos en el supuesto de una posible relación entre los espesores de estas capas, calculamos la resistividad longitudinal media de las mismas y estudiamos la parte de la curva de SEV que se interpreta, con ayuda de dicha resistividad.

Supongamos que se desconoce el espesor de las capas h_5 y h_6 pero por la información geológica general de la región podemos admitir que h_6 es dos veces mayor que h_5 . Entonces y según la ecuación de Hummel, hallamos que la incógnita ρ_l , resistividad media longitudinal de estas dos capas es igual a 1/26. De aquí que $\mu_K = \rho_6 / \gamma_K = 1 / 65$; $\rho_7 / \rho_l = 65$.

Utilizando para la interpretación de la última parte de la curva de SEV el ábaco de tres capas de las curvas de tipo H para $\mu_1 = 1/100$ y $\mu_2 = \infty$, obtenemos $\nu'_K = 1/2,5$. Pero $\mu_K = 1/65$ y no 1/100, por lo que efectuando el correspondiente cálculo conforme al principio de equivalencia, tendremos:

$$\nu_K = \nu'_K \cdot 100 / 65 \approx 0,6.$$

De aquí $h_5 + h_6 \approx x_K \cdot \nu_K = 54$. En realidad es $h_5 + h_6 = 48$.

Por esta interpretación de la curva de SEV obtenemos $H = 1 + 2 + 5 + 8,2 + 54 = 70,2 \cdot h_1$.

La verdadera profundidad de la superficie del horizonte de apoyo es $H=63 \cdot h_1$; por tanto, el error es de cerca de + 11% si se conocen las resistividades paramétricas del corte.

Veamos ahora cual será el error de interpretación si se considera dicha curva de SEV como de cinco capas, menospreciando las capas h_3, ρ_3 y h_5, ρ_5 que no se reflejan claramente en la curva.

Interpretando la parte izquierda de la curva de SEV, obtenemos como en el caso anterior $h_1=1; \rho_1=1; h_2=2$.

La curva de SEV aparentemente de cuatro capas de tipo KH la interpretamos basándonos en la posición del punto H anterior: $x_H=3; y_H=0,16$.

$$\text{Tomando } \rho_{3,4}=19, \text{ tendremos } \mu_H = \frac{\rho_{3,4}}{y_H} = 119; \frac{\rho_{5,6}}{y_H} = \frac{1}{6}.$$

El ábaco 62 ($\mu_i=39$) cuya curva de módulo $\nu_1=9$ coincide bastante bien con la parte izquierda de nuestra curva de SEV de cuatro capas, con un cierto desplazamiento del punto H ($x_H=3,2; y_H=0,15$) indica de este modo $\nu'_H=9$ para $\mu'_H=39$. En nuestro caso, y tomando un cierto punto H intermedio, daremos a μ'_H el valor $19/0,15 \approx 125$.

Efectuando el cálculo según el principio de equivalencia, que para las condiciones dadas es perfectamente aplicable, obtenemos:

$$\nu_H=9 \cdot 39/125=2,8 \quad \text{y} \quad h_{3,4}=x_H \cdot \nu_H=9.$$

La posición del punto K mediante la interpretación de la parte derecha de la curva, queda igual que anteriormente: $x_K=90, y_K=2,5$. Suponiendo $\rho_{5,6}=1/39$, hallamos $\mu_K=\rho_{5,6}/y_K \approx 1/97$. El ábaco de curvas de SEV de tres capas de tipo H correspondiente a $\mu_1=1/100$ nos da para la interpretación de esta parte de la curva $\nu_K=0,4$ y por consiguiente, $h_{5,6}=x_K \cdot \nu_K=36$. La profundidad del horizonte de apoyo obtenida es $H=1+2+9+36=48 \cdot h_1$, cuando su verdadero valor es $H=63 \cdot h_1$. El error es, por tanto, del orden de - 24%.

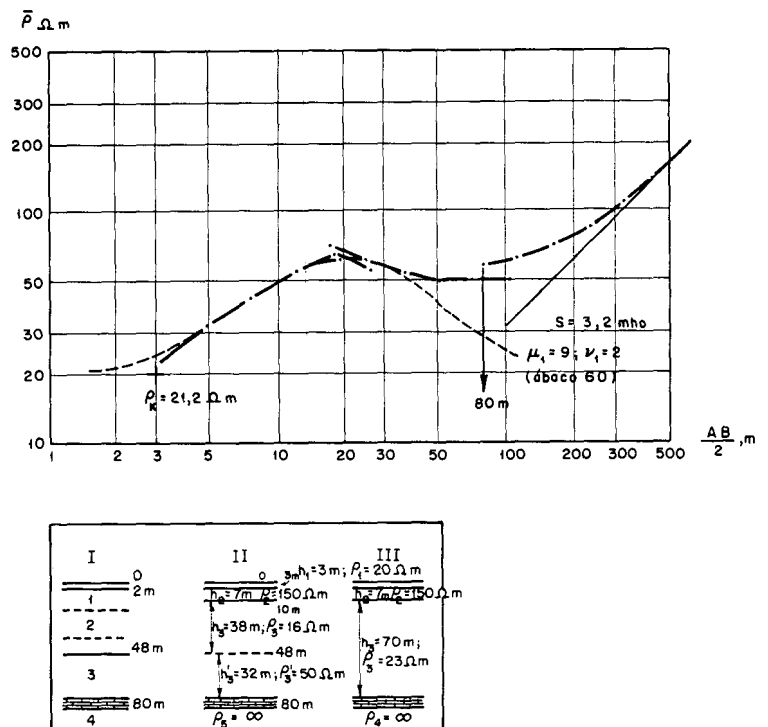
38. Cálculo generalizado de las resistividades paramétricas en el corte de capas múltiples; interpretación de las curvas de SEV de capas múltiples para
 $\rho_{ha} = \infty$

Veamos un ejemplo práctico del cálculo de las resistividades paramétricas de algunas capas en el corte de capas múltiples. La curva de SEV de la figura 263, obtenida en las proximidades de un sondeo mecánico, presenta el siguiente corte (de arriba abajo): 1) aluviones, 2 m; 2) sedimentos del piso batskico del Jurásico medio, con espesor total 46 m, que consta de tres capas, arenas limpias, rocas areno-arcillosas y arcillas; 3) calizas fracturadas del Carbonífero superior con 32 m de espesor; 4) calizas compactas del Carbonífero medio. Estas últimas sirven en el terreno investigado de horizonte de apoyo de resistividad muy alta; su techo se encuentra, en el punto examinado, a 80 m de profundidad.

La curva de SEV, que se ha prolongado hasta una separación $AB = 1000$ m, indica que debajo de una primera capa relativamente conductora (aluviones) yace un horizonte de resistividad alta, relacionado probablemente con las arenas del piso batskico. Después la curva de SEV señala aparentemente la serie conductora del piso batskico y los sedimentos del Carbonífero superior con resistividades más altas. La rama asintótica de la parte derecha que forma un ángulo de casi 45° con el eje de abscisas, refleja el horizonte de apoyo. Por tanto, el corte geoelectrico corresponde a un corte de cinco capas de tipo KHA.

Por los datos de la interpretación de las curvas de SEV próximos y de sondeos mecánicos se estableció que la resistividad de las arenas del piso batskico es de 150 ohm.m y la de las calizas fracturadas del Carbonífero superior de 50 ohm.m . Calcularemos la resistividad media de las dos capas conductoras del piso batskico y a continuación la resistividad media longitudinal conjunta de estas capas conductoras y de los sedimentos del Carbonífero superior. La valoración de esta resistividad media longitudinal del conjunto indicado de estratos es necesaria para la interpretación de la curva de SEV que, no obstante ser de cinco capas tiene aspecto de curva de cuatro capas de tipo KH, debido al espesor relativamente pequeño de la capa correspondiente al Carbonífero superior.

Fig. 263.—Cálculo de resistividades en un corte eléctrico de capas múltiples mediante curva de SEV efectuada en las proximidades de un sondeo mecánico en Mordovia (según G. A. Vedrintsev).
 I.—Corte geológico;
 II.—Corte eléctrico;
 III.—Corte eléctrico simplificado
 1.—Aluviones;
 2.—Sedimentos del piso batskico;
 3.—Calizas del Carbonífero superior.
 4.—Calizas del Carbonífero medio.



Interpretando la parte izquierda de la curva de SEV (fig. 263) con ayuda del ábaco 60 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 1$), obtenemos $h_1 = 3$ m, $\rho_1 = 20 \text{ ohm.m}$, $\nu_1 = 2$. Como sabemos que $\rho_2 = 150 \text{ ohm.m}$, entonces el valor verdadero de μ_1 es $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1 = 7,5$. A continuación calculamos, según el principio de equivalencia

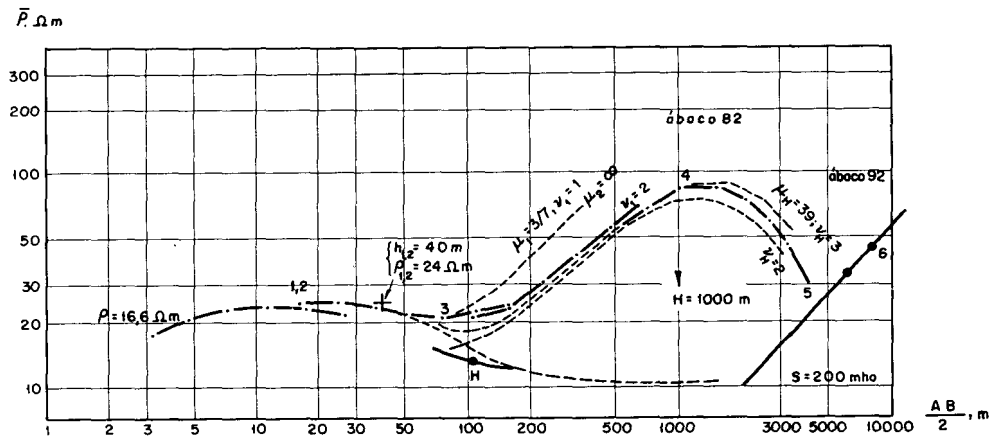
$\nu_1 = 2,4$ y de aquí $h_2 = 7$ m. Por tanto, $h_1 + h_2 = 10$ m. Teniendo en cuenta que según el sondeo mecánico la profundidad de su muro era de 48 m, hallamos que la parte conductora de los sedimentos batskicos (serie de arenas arcillosas y arcillas) llega hasta los 38 m de profundidad. Calculemos la resistividad media ρ_3 de este paquete conductor. Sabiendo que el espesor de la capa del Carbonífero superior es de 32 m, su resistividad $\rho_4 = 50$ ohm.m y $S = 3,2$ mho, aplicamos la ecuación de Hummel $S = 3/20 + 7/150 + 38/\rho_3 + 32/50 = 3,2$; de aquí $\rho_3 = 16$ ohm.m. Y esta es por consiguiente la resistividad media de las capas conductoras del piso batskico.

De la expresión $38/16 + 32/50 = 70/\rho_{3+4}$ se deduce fácilmente el valor de la resistividad media longitudinal ρ_{3+4} del conjunto de estas capas y la del Carbonífero superior al considerarlas como un solo horizonte eléctrico: $\rho_{3+4} = 23$ ohm.m.

De este modo, el corte geoelectrico de cinco capas se reduce a otro de cuatro capas de tipo KH en el que $\rho_2 = 150$ ohm.m y $\rho_{3+4} = 23$ ohm.m. Con estos valores de los parámetros se pueden interpretar con suficiente exactitud las curvas de SEV de los puntos próximos al punto de SEV estudiado.

Veamos un ejemplo práctico de interpretación de una curva de SEV con seis capas bien definidas de tipo KHKH (fig. 264). Esta curva llevada hasta una separación $AB = 16$ km, se obtuvo en el estudio de una zona de la República Autónoma de Mordovia. El corte geoelectrico de la región de trabajo (según N. A. Karpov) se indica a continuación.

Fig. 264.— Interpretación de curva práctica de SEV de capas múltiples (por N. A. Karpov). República Autónoma de Mordovia.



Capa 1.—Aluviones con espesor de 5 a 20 m y resistividad de 11-20 a 300 ohm.m.

Capa 2.—Paquete de sedimentos arenosos del Cretáceo Inferior (albense + aptense) con 50-60 m de espesor; en la curva de SEV aparecía una rama ascendente de pendiente suave con un máximo de $\bar{\rho}$ ($\bar{\rho} = 15-25$ ohm.m). En algunos puntos se incluyen en esta segunda capa, al parecer, también los sedimentos recientes.

Capa 3.—Sedimentos arcillosos del Cretáceo Inferior y del Jurásico con espesor de 20-100 m; en la curva de SEV se señalan con una caída. En virtud del análisis de las curvas de SEV la resistividad de esta capa 3 se toma condicionalmente como constante e igual a 10 ohm.m.

Capa 4.—Calizas compactas con interestratificaciones de arcilla y yeso del Carbonífero y Devónico Superior. El espesor de esta capa es de unos 250 m, y se marca por una rama descendente en la curva de SEV. Según los resultados de la testificación lateral focalizada (STL), efectuada en un sondeo mecánico próximo de apoyo se puede tomar la resistividad de esta capa 4 igual a 500 ohm.m.

Capa 5.—Calizas arcillosas y arcillas arenosas del Devónico Superior y Medio con 600-700 m de espesor. Se reflejan en la curva de SEV por una rama descendente con un mínimo bien definido de $\bar{\rho} = 2-30$ ohm.m. Por los datos de la STL anterior se toma en todos los puntos de SEV la resistividad de la capa 5 igual a 3,5 ohm.m.

Capa 6.—Roca cristalina precámbrica de resistividad prácticamente infinita. En la curva de SEV se refleja por la rama derecha ascendente que tiene una inclinación de 45° con el eje de abscisas.

Por el aspecto de la curva de SEV se ve que no supondrá un gran error, considerar esta curva como de cinco capas aceptando que la rama inicial de pendiente suave señala una capa de espesor $h_{1,2}$ igual a la suma de los espesores de las capas 1 y 2 y resistividad la indicada por el máximo suave de la curva. En este caso $\rho_{1,2} = 24$ ohm.m. Tomando $\rho_3 = 10$ ohm.m, obtenemos $\mu_1 = \rho_3 / \rho_{1,2} = 0,42$; $\rho_4 / \rho_3 = 50$.

Podemos utilizar para la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV (tipo H) el ábaco 82 ($\mu_1 = 3/7 = 0,43$; $\mu_2 = \infty$). Con ayuda de este ábaco hallamos $h_{1,2} = 40$ m; $\nu_1 = 1,7$; $h_3 = h_{1,2} \cdot \nu_2 \approx 68$. Mediante el ábaco auxiliar H obtenemos $x_H = 108$ m; $y_H = 13$ ohm.m. De aquí $\mu_H = \rho_4 / y_H \approx 39$; $\rho_5 / y_H = 3,5 / 13 \approx 1/4$. Para la interpretación de la parte media de la curva dada de SEV (tipo K) se puede utilizar el ábaco 92 ($\mu_1 = 39$, $\mu_2 = 0$). Llevando su origen de coordenadas al punto H, hallamos $\nu_H = 2,4$; de aquí $h_4 = x_H \cdot \nu_H = 260$ m. El espesor de la capa 5 se calcula por la expresión $h_5 = S_5 \cdot \rho_5$. Por la curva de SEV $S = 200$ mho y la suma $\sum_1^4 S_i$ la calculamos por los valores conocidos de los espesores y resistividades de las capas: $S_{1,2} + S_3 + S_4 = 1,7 + 6,8 + 0,5 = 9$; de donde $h_5 = 191 \cdot 3,5 \approx 670$ m. Por consiguiente, según esta interpretación de la curva dada de SEV, la profundidad H del basamento cristalino es de 1040 m. Dado que no se puede garantizar una precisión mayor de 10 m, redondeamos este valor hallado a 1000 m.

El error de interpretación depende ante todo de la exactitud en el cálculo de los parámetros iniciales ρ_3 , ρ_4 y de modo principal ρ_5 . Valorando el posible error en cada uno de estos parámetros se halla fácilmente el orden de magnitud del

posible error en la valoración del espesor de cada una de las capas por el método que ya conocemos expuesto en la metodología de la interpretación de las curvas de SEV de tres capas.

Si se suponen calculadas estas resistividades paramétricas con exactitud suficiente, entonces el error de interpretación puede relacionarse con que en la interpretación de la parte izquierda de la curva de SEV con ayuda del ábaco 82 se hizo $\rho_4 = \infty$ cuando en realidad era igual a 50 ohm.m y en la interpretación de la parte media de la misma tomamos $\rho_5 = 0$, siendo su valor verdadero de 3,5 ohm.m. Es fácil ver por el gráfico de la figura 150 que el error cometido en el primer caso es muy pequeño (del orden de + 7 m). Veamos por consiguiente la magnitud aproximada del posible error en la interpretación de la parte media de la curva de SEV con ayuda del gráfico de la figura 191. Este gráfico señala que al interpretar la curva de tres capas de tipo K en que $\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 1/4$ y $\nu_1 = 2$ mediante el ábaco en que $\mu_2 = 0$ introducimos en la valoración de h_2 un error del orden de +5%, es decir, de alrededor de +13 m. De este modo el error total en la interpretación de la curva de SEV al suponer $\rho_4 = \infty$ y $\rho_5 = 0$, resulta ser en este caso muy pequeño en comparación con la profundidad del horizonte de apoyo. Por tanto el valor obtenido para esta profundidad ($H = 1000$ m) puede suponerse próximo al verdadero.

Veamos ahora un ejemplo práctico de interpretación de una curva de SEV de capas múltiples para el caso de estar calculadas las resistividades de todas ellas. Sea la curva de SEV (fig. 265 b) obtenida en las proximidades de un sondeo mecánico cuyo corte geoelectrico se representa en la figura 265 a. Aparentemente la curva de SEV representa un corte eléctrico de siete capas de tipo HKHKH. Como horizonte de

CALCULO DE LAS RESISTIVIDADES

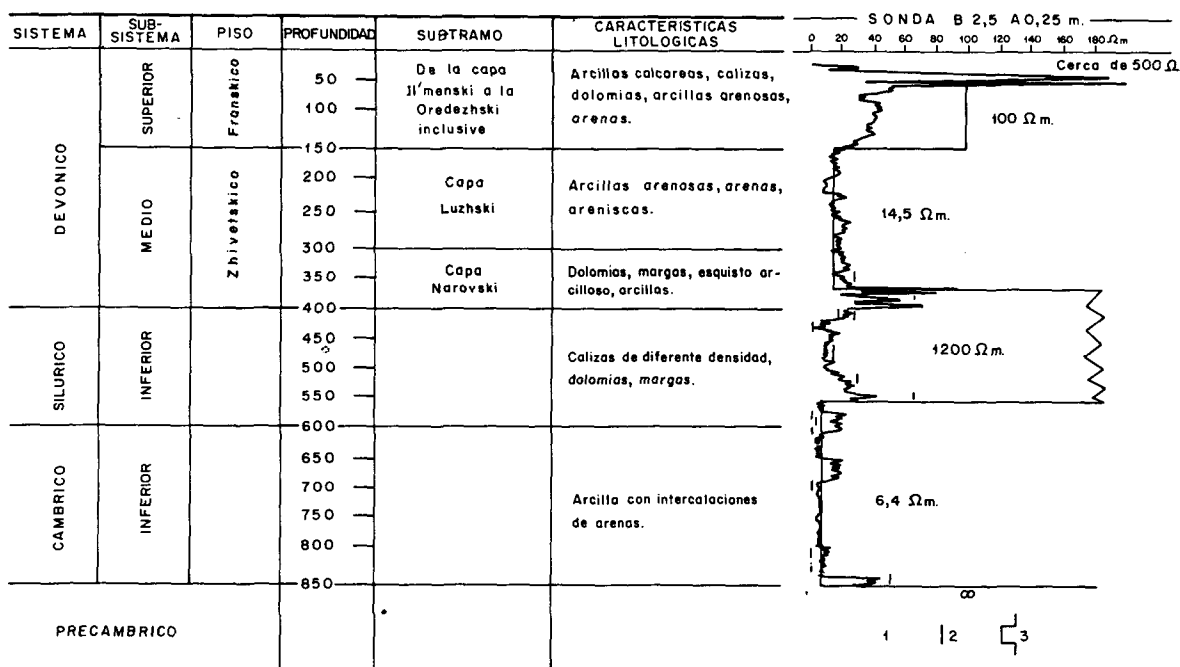
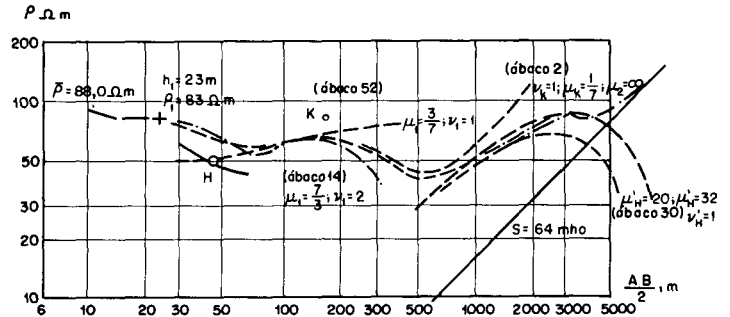


Fig. 265 a.— Cálculo de la resistividad de las capas, en una curva de SEV de capas múltiples próxima a un sondeo mecánico.
 1.—Datos de la diagráfia;
 2.—Datos del STL
 3.—Datos de la interpretación de la curva de SEV.

apoyo se tiene en este caso una roca cristalina del basamento precámbrico ($\rho = \infty$) cuya superficie ha encontrado la perforación a unos 850 m. El sondeo eléctrico se ha extendido hasta una separación $AB = 14$ km. La curva de SEV no posee ramal final asintótica de 45° con el eje de abscisas. Sin embargo supondremos que el último punto de la rama final está ya sobre esta asintota. En ese caso la conductancia longitudinal total de todo el conjunto sedimentario puede estimarse que es $S = 64$ mho. Por la diagrafía de la perforación hallamos también un valor análogo.

Fig. 265 b.— Interpretación de curva práctica de SEV de capas múltiples, cuyas resistividades se indican en la figura 265 a.



La curva de SEV pone de manifiesto la existencia en el corte de un horizonte de resistividad bastante alta que yace sobre una capa conductora (Silúrico Inferior sobre sedimentos cámbricos) que recubre el basamento. Las diagrafías de resistividad normal y lateral focalizada no señalan en la parte media del corte niveles de resistividad alta. Tan sólo en la parte baja de la capa Narovski y en el Silúrico Inferior se aprecian algunas interestratificaciones yesíferas de resistividad elevada (hasta 160 ohm.m).

Probablemente la primera subida de la parte derecha de la curva de SEV está relacionada con estas capas yesíferas interestratificadas de resistividad muy alta. Separadas entre sí por sedimentos conductores estas capas interestratificadas se reflejan en la curva de SEV junto con las rocas alternantes con ellas como un horizonte único de resistividad alta.

En la diagrafía no se reflejan a causa de su escaso espesor. Con este supuesto se puede calcular que la profundidad del yacente superior y el límite inferior de la capa de resistividad alta son 370 y 550 m respectivamente y por consiguiente, el espesor de esta capa de 180 m. Asimismo el espesor del horizonte eléctrico conductor inferior (parte baja del Silúrico Inferior y Cámbrico Inferior) es de 300 m. El techo del horizonte conductor superior es el Luzhckico (Tártaro) y parte alta de la capa Narovski, pudiéndose marcar su profundidad por la diagrafía en 150 m. El límite superior de la capa de relativamente alta resistividad (sedimentos del piso Franskico) está alrededor de los 25 m de profundidad. Es decir, que el diagrama de la testificación da la posibilidad, aunque no muy claramente expresada, de marcar los límites y espesores de los niveles eléctricos (tabla 55).

TABLA 55

POSICION DE LOS LIMITES DE SEPARACION Y ESPESORES DE LOS HORIZONTES ELECTRICOS

Horizontes eléctricos	Profundidad del límite inferior	Espesores (m)
De resistividad elevada	150	125
De resistividad reducida	370	220
De resistividad alta	550	180
De resistividad baja	850	300

Interpretemos la curva de SEV.

La gráfica de SEV indica en su parte inicial, un horizonte conductor relativamente poco profundo debajo de los aluviones. En la diagráfia se señala escasamente. Interpretando la rama izquierda de la curva (curva de SEV de tipo H), mediante la elección del ábaco adecuado, hallamos (ábaco 52 — $\mu_1 = 3/7$; $\mu_2 = 1$) $h_1 = 23$ m; $\rho_1 = 83$ ohm.m; $\nu_1 = 1$; $h_2 = 23$ m; $\rho_2 = 36$ ohm.m.

Por el ábaco H calculamos $x_H = 46$ m; $y_H = 50$ ohm.m.

Dado que se supone el límite de la capa de resistividad elevada a 150 m de profundidad, el espesor de la capa $h_3 = 104$ m, y $\nu_H = h_3/x_H = 2,3$. Interpretamos la parte siguiente de la curva dada de SEV, curva de tres capas de tipo K con punto inicial en x_H, y_H . El ábaco 14, de módulo $\nu_1 = 2$ y $\mu_2 = 0$ contiguo a ν_H , da $\mu_H = 7/3$. Pero en nuestro caso ν_H no es igual a 2, sino a 2,3. Por tanto, aplicando el principio de equivalencia, hallamos después del correspondiente cálculo, $\mu_H = 2,02$. Por consiguiente, $\rho_3 = \mu_H \cdot y_H = 100$ ohm.m.

Mediante el ábaco K hallamos $x_H = 180$ m; $y_H = 85$ ohm.m.

El espesor de la capa conductora según la diagráfia es $h_4 = 220$ m. De aquí $\nu_K = h_4/180 = 1,2$. Interpretando el siguiente tramo de la curva de SEV —curva de tipo H con punto inicial x_K, y_K , suponiendo que $\rho_5 = \infty$, no cometemos gran error en la valoración de ρ_4 . Por el ábaco 2 ($\nu_1 = 1, \mu_2 = \infty$) hallamos, mediante interpolación $\mu'_K = 1/7$. Utilizando la expresión del principio de equivalencia en S, que puede aplicarse perfectamente en este caso, obtenemos $\mu_K = 1,2/7$, y por tanto $\rho_4 = 14,5$ ohm.m.

Con ayuda de expresiones conocidas hallamos las coordenadas del segundo punto H':

$$x_{H'} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 370 \text{ m};$$

$$y_{H'} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{370}{17,2} = 21,5 \text{ ohm.m.}$$

Teniendo en cuenta que el espesor de la capa de alta resistividad es $h_5 = 180$ m, hallamos $\nu_H = h_5/x_H = 0,48$. Tomando para la interpretación de esta parte de la curva (curva de tipo K) el ábaco 11 ($\nu_1 = 0,5$, $\mu_2 = 0$), hallamos que $\mu_H > 39$. Para valorar μ_H , se puede recurrir al ábaco 309. Utilizando el mismo, obtenemos $\mu_H \approx 26$, y según el principio de equivalencia en T, teniendo presente que $\nu_H = 0,48$, hallamos $\mu_H = 54$. De aquí $\rho_5 = \gamma_H \cdot \mu_H \approx 1200$ m.

La resistividad de la capa conductora que yace sobre el horizonte de apoyo la obtenemos por la igualdad $\rho_6 = h_6/S_6$.

Calculando $S_6 = S - \sum_1^5 S_i$, obtenemos $S_6 = 64 - 17,3 = 46,7$ mho.

De aquí $\rho_6 = 300/46,7 = 6,4$ ohm.m.

Agrupando los resultados de la interpretación de la curva de SEV, obtenemos:

$h_1 = 23$ m; $\rho_1 = 83$ ohm.m	} Aluviones, sedimentos carbonatados y areno-arcillosos del piso franskico.
$h_2 = 23$ m; $\rho_2 = 36$ ohm.m	
$h_3 = 104$ m; $\rho_3 = 100$ ohm.m	
$h_4 = 220$ m; $\rho_4 = 14,5$ ohm.m	} Sedimentos areno-arcillosos del piso zhivetskico.
$h_5 = 180$ m; $\rho_5 = 1200$ ohm.m	} Sedimentos carbonatados y halogénicos de la capa inferior narovskica y Silúrico.
$h_6 = 300$ m; $\rho_6 = 6,4$ ohm.m	} Sedimentos areno-arcillosos cámbricos

$H \approx 850$ m

La exactitud en el cálculo de la resistividad paramétrica de las capas del corte depende de la exactitud en la valoración de la posición del límite de las mismas. En caso favorable, el error en el cálculo de las resistividades paramétricas según muestra la experiencia, no rebasa del $\pm 15\%$.

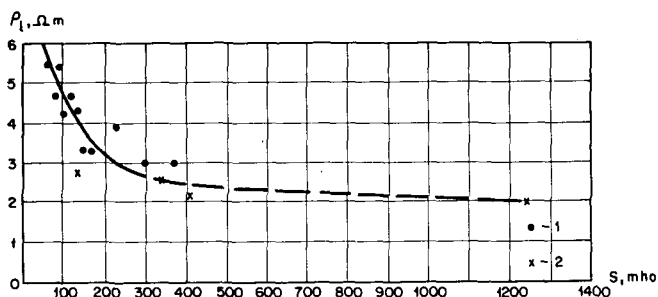
A menudo, no teniendo la posibilidad de calcular las resistividades paramétricas del corte de capas múltiples, se interpretan las curvas de SEV, para el caso de resistividad del horizonte de apoyo infinitamente grande, utilizando el valor de la resistividad longitudinal media ρ_l de todo el conjunto recoso que descansa sobre el horizonte de apoyo. Este valor ρ_l se calcula mediante curvas de SEV próximas a sondeos mecánicos o en puntos en que la profundidad del medio que se extiende debajo ($\rho_{ha} = \infty$) es conocida por los resultados de la exploración sísmica. Calculando por ejemplo ρ_l en el punto de SEV cuya curva hemos considerado, se obtiene $\rho_l = H/S = 850/64 = 13,3$ ohm.m.

El cálculo de ρ_l se realiza, si ello es posible, en una serie de puntos de la región que se investiga. Apoyándose en estos valores y mediante interpolación, se procura calcular ρ_l en cada punto de SEV. Frecuentemente, en caso de un número elevado de valores calculados de ρ_l y variación regular de los mismos, se construyen gráficas que relacionan ρ_l con S y con la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$, como en el caso del corte de cuatro capas

considerado anteriormente. Los valores de ρ_i para tales gráficas se obtienen a veces no sólo de los SEV próximos a sondeos mecánicos y a puntos de exploración sísmica sino también por los resultados de curvas de SEV claramente definidas. En el ejemplo de la figura 266 se presenta una gráfica de este tipo correspondiente a un corte de capas múltiples obtenido en la exploración de una región de Bielorrusia. Mediante la utilización de esta gráfica se puede, hallando el valor de S en cada punto de SEV de la región investigada, valorar ρ_i y hallar la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo, mediante la fórmula $H = S \cdot \rho_i$.

Fig. 266.—
Relación entre ρ_i
y S según datos
de interpretación
de curvas de SEV
paramétricas y de
otro tipo (por
V. A. Lipilin) Re-
pública de Bielo-
rrusia.

- 1.—Valores de ρ_i obtenidos por datos de interpretación de curvas de SEV;
- 2.—Valores de ρ_i obtenidos de datos de la perforación y SEV paramétricos.



39. Interpretación de curvas de SEV de capas múltiples para $\rho_{na} \neq \infty$

Del mismo modo que en el estudio efectuado anteriormente para el corte de cuatro capas, si en el corte de capas múltiples la resistividad del horizonte de apoyo no es infinitamente grande, se puede, en caso de existir cierto número de sondeos mecánicos o de puntos de observación sísmica cerca de los cuales se han realizado SEV, poner de manifiesto la dependencia gráfica entre el valor de la resistividad media ρ_i del corte y la abcisa L. Tales gráficas en caso de corte de capas múltiples tendrá el mismo carácter que en el caso del corte de cuatro capas.

Para $\rho_{na} \neq \infty$ en caso de corte de capas múltiples, como ha señalado K.A. Shajnes, puede aprovecharse la dependencia no sólo de ρ_i y L sino también ρ_i y α , siendo α el ángulo de inclinación de la rama final de la curva de SEV con el eje de abcisas. Esta gráfica tiene el mismo aspecto que las citadas para el corte de cuatro capas. La cuestión de qué tipo de gráfica debe utilizarse en la interpretación de las curvas de SEV, como señala la experiencia de trabajo en Saratov del Trasvolga, se soluciona en la práctica sin especial dificultad.

A veces, en la práctica y para interpretación de las curvas de SEV de capas múltiples se utiliza el método de comparación de la curva con gráficas calibradas de SEV para las que se conoce la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo.

Hay que subrayar la escasa confiabilidad de este método en el caso de corte de capas múltiples. La experiencia demuestra que en un mismo terreno y para curvas de SEV que pueden hacerse coincidir bastante bien entre sí, la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo puede ser muy distinta. El error de interpretación por el método de comparación es muy elevado. Por ejemplo, si la curva de SEV 9 (fig. 267 a) se interpreta con ayuda de la curva calibrada de SEV 151, efectuada en un punto en que se conoce la profundidad de esta superficie H del horizonte de apoyo, el error que se comete es de -60% aproximadamente.

Aún mayor error (del orden de $+70\%$) se cometería al interpretar por ejemplo la curva 152 mediante su comparación con la curva de SEV calibrada 15 (fig. 267 b). La profundidad calculada en este caso sería de 235 m, mientras que en el punto de SEV 152 es igual a 140 m.

Por tanto para la interpretación de las curvas de SEV de capas múltiples e incluso de cuatro capas debe evitarse la aplicación del método de comparación.

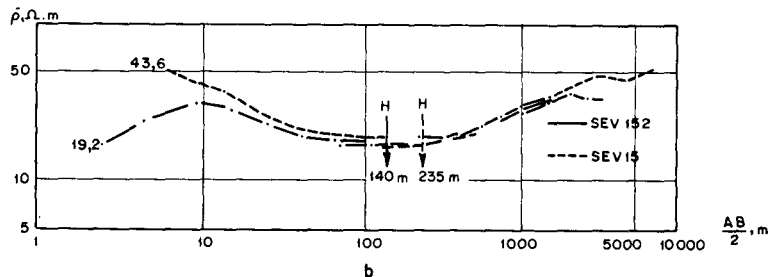
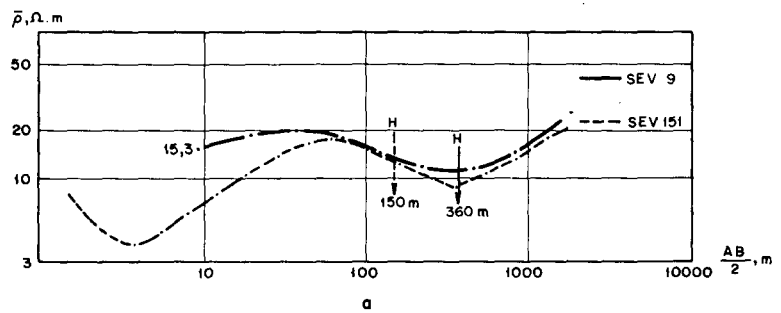


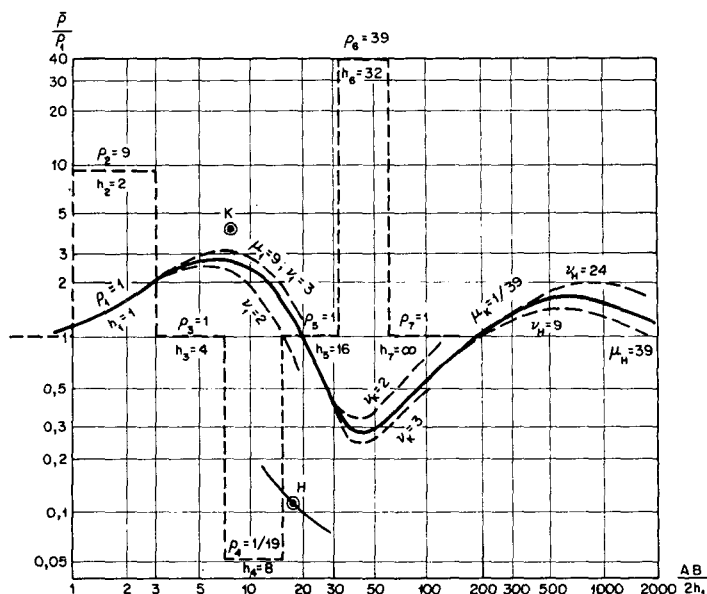
Fig. 267.—
Errores de interpretación de curvas de SEV por el método de comparación (por K. A. Shajnes) Región de Saratov

40. Interpretación de curvas de SEV calculadas y prácticas en un corte de capas múltiples con horizonte de apoyo conductor

La interpretación de las curvas de SEV de capas múltiples representativas de cortes en el que el horizonte de apoyo está formado por rocas conductoras se efectúa por los mismos procedimientos que en el caso de curvas de SEV con horizonte de apoyo de resistividad elevada. Sólo se excluye el uso del método de interpretación simplificado por S y ρ ó por L , α y ρ_r .

Estudiemos la curva de SEV calculada para un corte eléctrico de siete capas de tipo KQHAK (fig. 268). En dicho corte el espesor de sus capas es el mismo que en el corte de siete

Fig. 268.—
Interpretación de
una curva de SEV
de siete capas de
tipo KQHAK.
 $h_1=1; h_2=2; h_3=4;$
 $h_4=8; h_5=16;$
 $h_6=32; h_7=\infty;$
 $\rho_1=1; \rho_2=9; \rho_3=1;$
 $\rho_4=1/19; \rho_5=1;$
 $\rho_6=39; \rho_7=1.$



capas examinado por nosotros anteriormente (fig. 262). Las resistividades de las capas 1, 3, 5 y 7 permanecen las mismas y las resistividades de los niveles 2, 4 y 6 son las inversas de las correspondientes al caso citado.

También, como en el primer ejemplo, en la curva de SEV sólo se reflejan claramente cinco capas: cada uno de los conjuntos 3, 4 y 5,6 se señalan como una capa de baja (3,4) y alta (5,6) resistividad. Es precisamente por ello que la curva de SEV aparenta ser de cinco capas de tipo KHK. La interpretación de esta curva como de siete capas no es factible a pesar de que conocemos exactamente las resistividades de todas sus capas. Fácilmente se ve que la interpretación de las correspondientes ramas, descendente de carácter monótono una y ascendente de tipo rectilíneo otra, en la curva de SEV no es posible.

Veamos el orden de magnitud del error que se comete en el resultado de la interpretación al suponer la curva como de cinco capas.

Interpretando la parte izquierda de la curva con ayuda del ábaco 90 ($\mu_1=9; \mu_2=0$), hallamos $h_1=1, \rho_1=1, h_2=2.5$. Utilizando el ábaco auxiliar K hallamos $x_K=7, y_K=4.2$. Supongamos que calculamos la resistividad media longitudinal de las dos capas conductoras (h_3, ρ_3) y (h_4, ρ_4) conociendo la resistividad de cada una de ellas y en el supuesto de que el espesor de la segunda es doble que el de la primera: $1/1 + 2/(1/19) = 3/\rho_{3,4} = 1/13$. Por tanto $\mu_K = \rho_{3,4}/y_K = 1/55$. En la parte examinada del corte es aplicable entre amplios límites el principio de equivalencia. Por ello hacemos uso para la interpretación de la parte media de la curva del ábaco 81 ($\mu_1=1/39, \mu_2=\infty$); resultando $\nu_K=2.7$, si se varía al mismo tiempo la abcisa del punto K ligeramente: $x_K=7.5$, con lo que sube el valor de la incógnita h_2 ($h_2=2.8$). Efectuamos el siguiente cálculo según el principio de equivalencia: $\nu_K = (\nu_K \cdot 39)/55 \approx 1.9$. Entonces $h_{3,4} = x_K \cdot \nu_K = 14.3$. Calculamos

la posición del punto H inicial para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_{3,4} + 18,1; \quad y_H = \frac{h_1 + h_2 + h_{3,4}}{S_1 + S_2 + S_{3,4}} \approx 0,1$$

Tomando la resistividad del conjunto de las capas 5 y 6, $\rho_{5,6} = 39$, tendremos $\mu_H = \rho_{5,6}/\gamma_H = 390$; $\rho_7/\gamma_H = 10$. En esta parte del corte se extiende ampliamente el principio de equivalencia. Por tanto se puede tomar para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV el ábaco 426 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 \approx 6$) y entonces (fig. 268) $\nu_H = 1,5$ para un punto H algo desplazado ($x_H = 17$). Efectuando el cálculo según el principio de equivalencia, obtenemos $\nu_H = 1,5$ y $h_{5,6} = x_H \cdot \nu_H = 26$. Por tanto, según estos resultados de la interpretación, la profundidad del horizonte de apoyo es $H = 43 \cdot h_1$. El error total de interpretación es de -30% , aproximadamente, siendo el error máximo (del orden de -50%) el del espesor conjunto de las capas 5 y 6.

La exactitud en la interpretación de la curva de SEV podría aumentarse si en lugar de ρ_6 tomamos la resistividad transversal media $\rho_{5,6}$ del conjunto de las capas 5 y 6. Recordemos la expresión de esta resistividad para dos capas $\rho_t = (h_5 \cdot \rho_5 + h_6 \cdot \rho_6)/(h_5 + h_6)$. En la práctica, sin embargo, puede desconocerse el espesor absoluto de las capas h_5 y h_6 , sabiéndose tan sólo por ejemplo que la capa h_6 tiene un espesor doble que la capa h_5 . En este caso $\rho_{5,6} = (1 \cdot 1 + 2 \cdot 39)/(1 + 2) \approx 26$ y $\mu_H = 260$. El valor de ν_H que obtendríamos sería igual a 2,25 y el espesor de la capa $h_{5,6} = 17 \cdot 2 + 2,25 \approx 38$, $H = 55 \cdot h_1$. El error en el cálculo del espesor conjunto de las capas 5 y 6 sería en este caso del orden de -20% y el error total de la interpretación bajaría a -13% aproximadamente.

Es decir, que para la interpretación de las curvas de SEV pertenecientes a un corte eléctrico de capas múltiples que no evidencia claramente todas sus capas en la curva correspondiente conviene partir de una resistividad media de las capas complejas que se reflejan en la curva. Para ello es preciso calcular en las partes de tipo H o A del corte, la resistividad media longitudinal ρ_l del conjunto de esas capas y para la interpretación de las partes de tipo K y Q la resistividad media transversal ρ_t .

A falta de datos para el cálculo exacto de las resistividades paramétricas del corte de capas múltiples, se suelen estimar valores convencionales más probables en función de todos los datos de la exploración eléctrica de la región, junto con la restante información geológica o de otro tipo que se pueda obtener.

Veamos la interpretación de una curva de SEV práctica de capas múltiples representativa de un corte con horizonte de apoyo conductor. En la figura 269 se tiene una curva de SEV relativamente mal definida que se ha efectuado en la región central de la plataforma Rusa. La curva de SEV se ha llevado

hasta una separación $AB = 16$ km, sin que señale aún el basamento cristalino precámbrico, sirviendo aquí como horizonte de apoyo eléctrico un conjunto de sedimentos devónicos (conductores) que se reflejan claramente en la rama final descendente de la curva de SEV. La designación estratigráfica de los horizontes eléctricos es la siguiente:

Capa 1.—Aluviones con resistividades, en general, bajas.

Capa 2.—Calizas del subpiso okskico del Carbonífero inferior con resistividad relativamente alta.

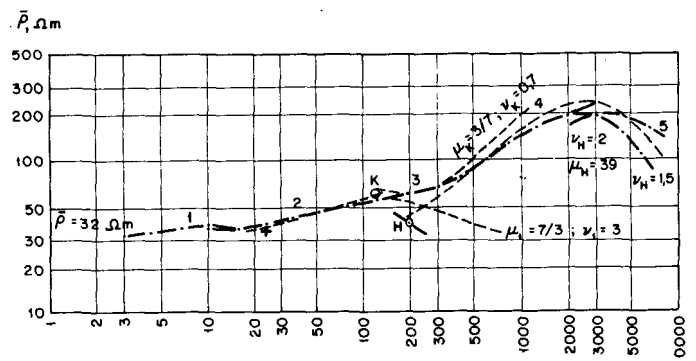
Capa 3.—Sedimentos arenisco-arcillosos del subpiso bajo lasnopolianskico (horizonte tul'skico) del Carbonífero Inferior y de resistividad baja.

Capa 4.—Sedimentos yesíferos del dankico-lebedianskido y capas calizas infrayacentes del Devónico superior y de resistividad alta.

Capa 5.—Paquete de sedimentos arenisco-arcillosos, conductores del período Devónico.

El corte eléctrico, como vemos, es del tipo KHK, aunque se puede asimilar por su aspecto a una curva de SEV de tipo AAK.

Fig. 269.— Interpretación de curva de SEV de cinco capas de tipo KHK. (por G. I. Surits) Región central de la Plataforma Rusa.



La resistividad de la capa 2 varía entre amplios límites dentro de la zona explorada. Su valor fue estimado en función de las condiciones geológicas, por el análisis de las curvas de SEV y mediante los ábacos. En el puesto de SEV dado se tomó igual a 80 ohm.m.

La resistividad de la capa 3, por lo señalado por la testificación de sondeos mecánicos en la región explorada se tomó condicionalmente como constante e igual a 30 ohm.m. La resistividad de la capa 4 se calculó en función de los resultados del análisis cualitativo de la posición $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV y datos de testificación variando entre 500 y 1000 ohm.m. En el punto de SEV dado se tomó el límite superior de su valor.

La resistividad del horizonte de apoyo se tomó condicionalmente igual a 30 ohm.m.

Pasemos a la interpretación de la curva de SEV.

Menospreciando la rama inicial y poniendo $\rho_2 = 80$ ohm.m, $\rho_3 = 30$ ohm.m, hallamos por la interpretación de la parte izquierda de la gráfica (curva de SEV de tipo K) con ayuda del ábaco 58 ($\mu_1 = 7/3$, $\mu_2 = 10$), $h_1 = 23$ m, $\rho_1 = 34$ ohm.m, $\nu_1 = 3$. De aquí $h_2 = 69$ m, $\rho_2 = 80$ ohm.m.

El ábaco auxiliar K da $x_K = 120$ m, $y_K = 60$ ohm.m de donde $\mu_K = \rho_3/y_K = 0,5$, $\rho_4/y_K = 17$.

Utilizando para la interpretación de la parte media (curva de SEV de tipo H) de la gráfica de SEV dada por el ábaco 82 ($\mu_1 = 3/7 = 0,43$; $\mu_2 = \infty$), obtenemos $\nu_K = 0,7$. Teniendo presente que $\mu_K = 0,5$ hallamos, conforme al principio de equivalencia,

$$\nu_K = 0,7 \cdot 0,5 / 0,43 = 0,81$$

De aquí, $h_3 = 97$ m.

Calculemos la posición del punto H:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_3 = 190 \text{ m}; \quad y_H = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{190}{4,87} = 39 \text{ ohm.m.}$$

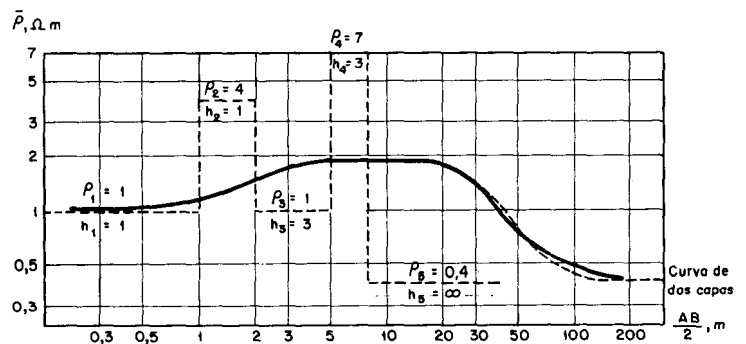
Esto da $\mu_H = \rho_4/y_H \approx 26$, $\rho_5/y_H \approx 1$.

Interpretando la parte derecha de la gráfica (curva de SEV de tipo K) con ayuda del ábaco 62 ($\mu_1 = 39$, $\mu_2 = 1$), hallamos $\nu_H \approx 1,7$, es decir $h_4 \approx 320$ m para $\rho_4 = 1500$ ohm.m. Si por la fórmula del principio de equivalencia pasamos a la resistividad $\rho_4 = 1000$ ohm.m, entonces $h_4 = 480$ m. De este modo la profundidad del horizonte de apoyo conductor en el punto considerado de SEV es de 700 m aproximadamente.

El error de interpretación puede relacionarse en este caso principalmente con el error en la valoración de la resistividad ρ_4 , de la que depende el valor del espesor de la capa h_4 . Este parámetro, que depende de la proporción de roca yesífera del Devónico superior, puede variar mucho en la zona. Con toda probabilidad en el punto dado es de más de 1000 ohm.m. Si se hace por ejemplo igual a 2000, 3000 ohm.m o incluso más, lo que es admisible dado el curso de la curva de SEV (es aplicable entre amplios límites el principio de equivalencia), entonces el espesor h_4 disminuye a 240, 160 m y aún valores más bajos; si ρ_4 es menor que 1000 ohm.m, entonces el espesor h_4 sería mayor que el valor que hemos obtenido. Por tanto, el resultado de la interpretación de las curvas de SEV en tal caso es preciso calcularlo condicionalmente. La profundidad del horizonte de apoyo considerada, sólo es exacta con la condición de que el valor de ρ_4 sea próximo al indicado. A veces, a causa de variaciones irregulares considerables de los valores del espesor (h_4) del horizonte de resistividad elevada hay que renunciar a la interpretación de las curvas de SEV por el horizonte de apoyo conductor (ρ_5) y se limita el cálculo a obtener la profundidad hasta la superficie del horizonte de alta resistividad.

Con frecuencia, las curvas de SEV de capas múltiples no están expresadas con la suficiente claridad para que sea factible dividir el corte en horizontes separados y menos aún poder valorar sus parámetros. En el ejemplo de la figura 270 se tiene una curva calculada de SEV que corresponde a un corte de cinco capas de tipo KHK. Despreciando algunos detalles, dicha curva aparenta ser de tres capas de tipo K con un $\bar{\rho}_{max}$ muy extenso lo que evidenciaría un espesor considerable de la capa de alta resistividad. Una curva tal que corresponda realmente a un corte de tres capas se interpreta como de dos capas sin cometer por ello un error grande. Con esta aproximación, en nuestra curva obtendríamos $\rho_{1,2} \approx 2$; $H = 17$; es decir, ello supondría más de 100% de error en la valoración de la profundidad del horizonte de apoyo conductor. No es posible en tal caso evitar en la interpretación de la curva de SEV un error por exceso en el cálculo de la profundidad H . Si se puede comparar el resultado de la interpretación de tales curvas de SEV con los datos de alguna perforación llevada hasta el horizonte de apoyo, se puede calcular un cierto coeficiente medio del exceso cometido en el valor de la profundidad y a continuación y de modo condicional extender el mismo a todas las curvas de SEV de aspecto análogo y, partiendo de este convenio, obtener los valores H para cada punto de SEV. En el caso considerado este coeficiente sería aproximadamente igual a 2.

Fig. 270.—Curva de SEV calculada de cinco capas, de tipo KHK.
 $h_1 = 1$; $h_2 = 1$; $h_3 = 3$;
 $h_4 = 3$; $h_5 = \infty$;
 $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 4$; $\rho_3 = 1$;
 $\rho_4 = 7$; $\rho_5 = 0,4$.

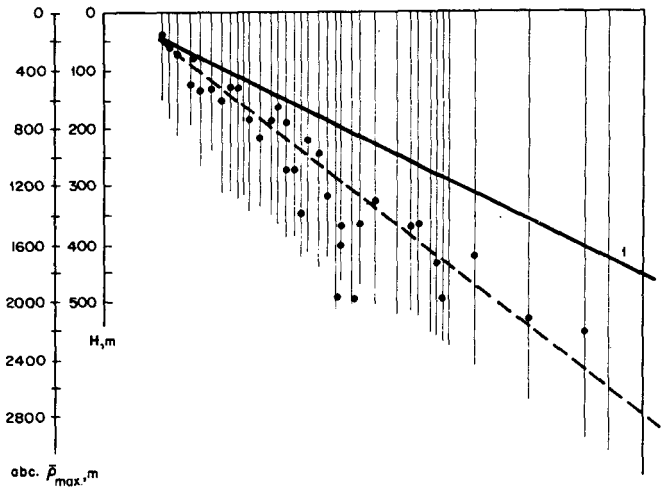


A veces y también de un modo totalmente convencional se toma como profundidad del horizonte de apoyo la abcisa del punto medio del valor máximo de $\bar{\rho}$. En nuestro caso sería $H \approx 9$ a $10 \cdot h_1$. Pero este método de interpretación de tipo arbitrario no tiene un fundamento preciso.

Para el caso de curvas de SEV de tres capas de tipo K se había considerado la existencia de una cierta relación entre la magnitud de la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$ en la curva y la profundidad del horizonte de apoyo conductor. Esta relación también existe en cierta manera en el caso del corte de capas múltiples con horizontes de apoyo conductor.

En la figura 271 se ha marcado la línea que caracteriza la magnitud de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo de baja resistividad según los resultados de numerosos sondeos mecánicos y testificación de los mismos en la zona de Ujta en la República Autónoma de Komi. En el mismo

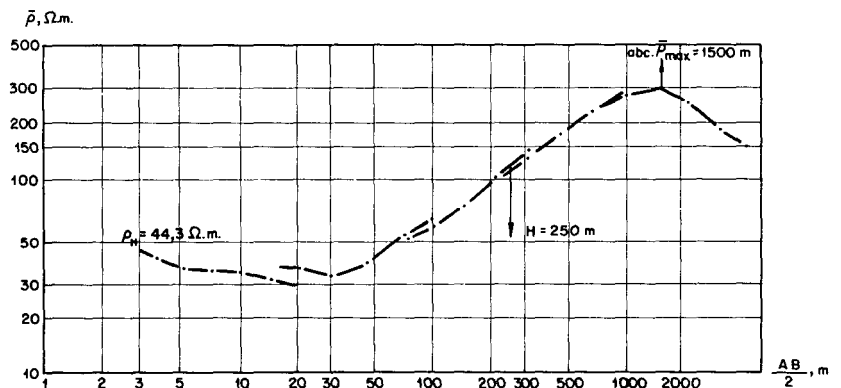
Fig. 271.—
Relación entre la
variación de abc .
 $\bar{\rho}_{max}$ en curvas de
SEV de capas
múltiples (de los
tipos HAK, KHK,
HKHK y otros) y
la profundidad de
la superficie del
horizonte de
apoyo conductor
(por M. A.
Berezin). Zona de
Ujta, República
Autónoma de los
Komi.
1.—Superficie del
horizonte de
apoyo conductor.



dibujo, debajo de cada sondeo mecánico, indicado en el eje horizontal del gráfico, se ha trazado a escala el valor de la abscisa de $\bar{\rho}_{max}$, obtenido en la curva de un SEV contiguo a la perforación. A pesar de la dispersión de los puntos correspondientes a estas magnitudes de la abscisa $\bar{\rho}_{max}$, se ve claramente que en general estos últimos aumentan al crecer la profundidad del horizonte de apoyo.

Sea la curva de SEV de la figura 272 efectuada en la región en la que se obtuvieron los datos del gráfico anterior. Esta curva refleja el siguiente corte geoelectrico: 1) aluviones de 10 a 100 m de espesor y resistividad 30 a 50 ohm.m; 2) sedimentos del periodo Carbonífero de 30 a 100 m y 400 a 600 ohm.m de resistividad (caliza dolomítica); 3) areniscas

Fig. 272.—Curva
de SEV,
correspondiente a
un corte de tipo
HKHK. Región de
Ujta, República
Autónoma de los
Komi.



arcillosas relativamente conductoras (100 a 50 ohm.m) del Carbonífero inferior de hasta 50 m de espesor; 4) sedimentos compuestos por dolomías calcáreas (capa Izhemski) piso Famenskico del Devónico superior, de alta resistividad (1000 a 1500 ohm.m) y espesor del orden de 100 a 200 m; 5) sedimentos de calizas margosas y dolomías (capas Ujtinskica y Sirachoiskica) del piso Franskico del Devónico superior; su resistividad oscila entre amplios límites, no pudiendo distinguirse de la correspondiente a la capa Izhemski pero que

puede llegar a tener una resistividad tan pequeña relativamente hasta 50 a 30 ohm.m, que llega a señalarse en la curva de SEV como un horizonte conductor; su espesor es del mismo orden que el de la capa Izhemski; 6) sedimentos arcillosos (capa Vetlasianski) fundamentalmente conductores (15 a 10 ohm.m), del piso Franskico con espesor de hasta 250 m y más. En algunas zonas, cuando en la composición de la capa Vetlasianski entran calizas, se confunde total o parcialmente con la capa Sirachoiski en un solo horizonte eléctrico.

De horizonte de apoyo, en gran parte de la zona investigada sirven los sedimentos conductores de las capas Sirachoiski o Vetlasianski que se señalan en la rama descendente de la curva de SEV (separación AB=6 a 8 km). En función de la relación entre las resistividades paramétricas en la parte baja del corte puede variar la posición de la superficie del horizonte de apoyo dentro de la columna estratigráfica. Dicha superficie puede ser la de la capa Sirachoiski o la de la Vetlasianski; puede encontrarse en el interior de estos horizontes e incluso en la capa Izhemski. Ello complica extraordinariamente sin duda la exploración eléctrica de la región. Utilizando el gráfico citado que relaciona H y la abcisa de $\bar{\rho}_{max}$, obtendremos aproximadamente la valoración de la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo conductor, sin necesidad de basarse para ello en datos estratigráficos.

La solución del problema de asignar la superficie del horizonte de apoyo eléctrico conductor a un nivel estratigráfico dado, cuya profundidad se calcula mediante las curvas de SEV, es en tales condiciones, con frecuencia, dificultosa y complicada. Sin embargo este método simplificado de interpretación ha permitido formarse una idea muy exacta de la estructura del terreno en una amplia zona de la República de los Komi. La práctica ha puesto de manifiesto que el error en el cálculo de H ha sido en la región de Ujta de +20 m, en promedio y sólo en casos especiales ha subido hasta +70 m, (la verdadera profundidad del horizonte de apoyo oscila entre 400 y 450 m).

La dispersión de los puntos del gráfico está relacionado probablemente con la influencia de la variación del espesor y resistividad de la capa de aluviones y también con la variación de las propiedades eléctricas de las restantes capas del corte, especialmente y según parece, de las resistividades de las capas 2 y 5.

41. Sobre la interpretación cualitativa de curvas de SEV de capas múltiples

Para la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de capas múltiples se confeccionan, como en el caso de la interpretación de las curvas de SEV de tres y cuatro capas, planos, perfiles y cortes.

La interpretación de planos y otros documentos de tipo cualitativo se basa, en el caso de cortes de capas múltiples, en un mayor número de suposiciones que en el caso de cortes de tres y cuatro capas. Por ello también los resultados

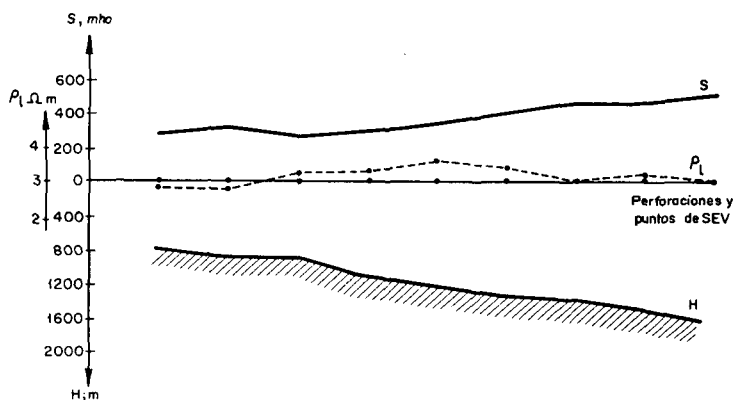
de la interpretación cualitativa de las curvas de SEV de capas múltiples son normalmente menos exactos.

Sin embargo, aún en el caso de profundidades muy grandes del horizonte de apoyo y de cortes complejos, los planos y perfiles cualitativos reflejan a menudo muy claramente las líneas generales de la marcha de la superficie del horizonte de apoyo, en especial si este tiene resistividad muy alta. A este respecto son apropiados sobre todo los planos y perfiles de valores de la conductancia longitudinal total (S) del conjunto sedimentario. En la figura 273 se representa una línea que fija la profundidad del basamento, según datos de sondeos mecánicos, en la depresión de la región de Siberia Occidental, junto con una gráfica de la variación de S . Las curvas de SEV reflejan en este caso no sólo cortes de cuatro capas sino también de cinco capas de tipo KQH y otros. La resistividad media longitudinal ρ_l de todo el conjunto sedimentario varía entre límites relativamente pequeños hasta $\pm 15\%$ de la media aritmética de sus valores. Como se ve, el aumento de la profundidad del basamento de 800 a 1600 m, lleva consigo un aumento casi proporcional del valor S .

Por esta gráfica se ve claramente que los planos S , en una región con estas condiciones geológicas, señalarán a grandes rasgos y con suficiente exactitud el relieve de la superficie del horizonte de apoyo.

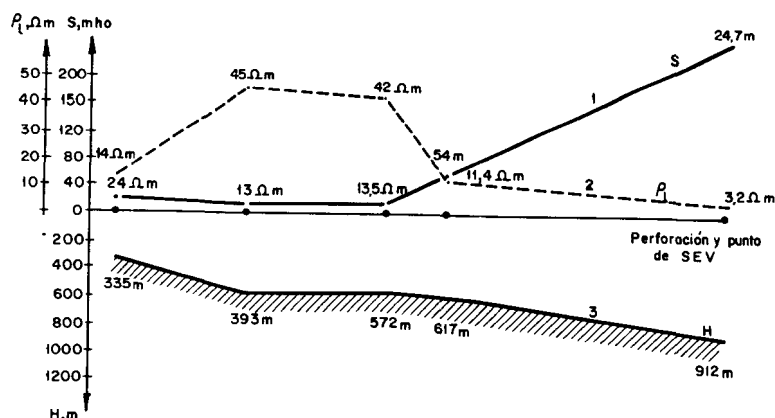
A menudo la magnitud S está ligada no tanto con el aumento del espesor de los sedimentos (es decir con el hundimiento de horizonte de alta resistividad) como con el descenso de resistividad de las capas conductoras y por consiguiente de la resistividad media longitudinal ρ_l de todo el conjunto sedimentario.

Fig. 273.—
Relación entre la
variación de H , S
y ρ_l , según datos
de perforaciones
y de SEV (por
M. S. Savinski)
Siberia Baja
Occidental.
Región de Tiumen



Un caso de este tipo, estudiado por A. M. Zagarmistr, se presenta en la figura 274. En el caso de determinada región de la vertiente meridional del Escudo Báltico en la fosa prebáltica se aprecia un fuerte aumento en el valor de S (de 13,5 a 247 mho) del conjunto de rocas sedimentarias que descansan sobre el basamento precámbrico. La profundidad de este basamento (según datos de sondeos mecánicos) aumenta en esta zona vez y media, de 617 a 912 m. El

Fig. 274.—
Relación entre
variación de H, S
y ρ_l .
Vertiente
meridional del
escudo báltico.
Fosa prebáltica
(por A. M.
Zagarmistr).
1.—Valor de la
conductancia
longitudinal total
S en ohm;
2.—Valor de ρ_l en
ohm.m.;
3.—Superficie del
basamento
precámbrico.



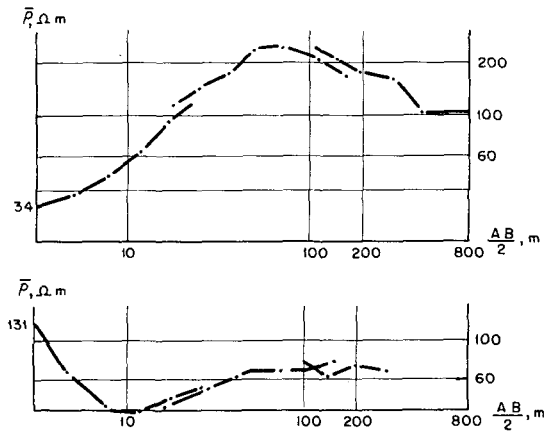
aumento de S está provocado por un descenso considerable de ρ_l de 45 a 3,7 ohm.m, relacionado con la mineralización elevada del agua de los sedimentos de edad cámbrica en la zona de estos últimos puntos de SEV.

Como pone de manifiesto la investigación de los cortes eléctricos de capas múltiples mediante las curvas de SEV comparando sus resultados con los datos de sondeos mecánicos profundos, la relación entre S y la profundidad H del horizonte de apoyo y su testificación es bastante compleja. Sin embargo es completamente posible utilizar el valor S, en el caso de cortes de capas múltiples, para poder diferenciar la zona de exploración, en grandes áreas de levantamiento y hundimiento del horizonte de apoyo de alta resistividad.

El estudio de la variación cualitativa y cuantitativa de las curvas de capas múltiples y de sus puntos extremales de unos puntos de SEV a otros y la composición de planos de tipos de curvas de SEV, lo mismo que en el caso de cortes más simples, permite descubrir y analizar muchas características de los cortes estudiados: aparición o desaparición de una capa dada, variación brusca de sus facies, anomalías en la continuidad del basamento, zonas de rocas antiguas derrubadas, etc. Mediante la interpretación cualitativa de las curvas de SEV también es posible, en ciertas regiones, fijar claramente los límites de la extensión de sedimentos con resistividad elevada y separar las zonas en que estas no se aprecian.

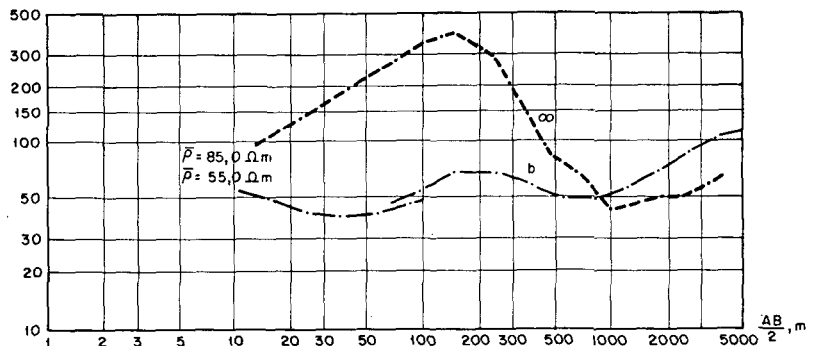
En el ejemplo de la figura 275 se presentan dos curvas de SEV efectuadas en la misma zona, la forma de las cuales evidencia la presencia o ausencia de las calizas de Carbonífero inferior, que poseen resistividad elevada. Como se ve, en el caso de existencia de estas calizas (fig. 275 a), en la curva de SEV se tiene un $\bar{\rho}_{max}$ superior a 200 ohm.m. En el caso de ausencia de estas calizas (fig. 275 b) el máximo de la curva de SEV, no excede de 70 ohm.m. Agrupando las curvas de SEV de uno u otro aspecto fue posible delimitar claramente en la región explorada las áreas en que existían las calizas de aquellas en que habían desaparecido total o parcialmente por la erosión.

Fig. 275.— Interpretación cualitativa de curvas de SEV, que permite poner de manifiesto las zonas de calizas. Región de Kalinin.



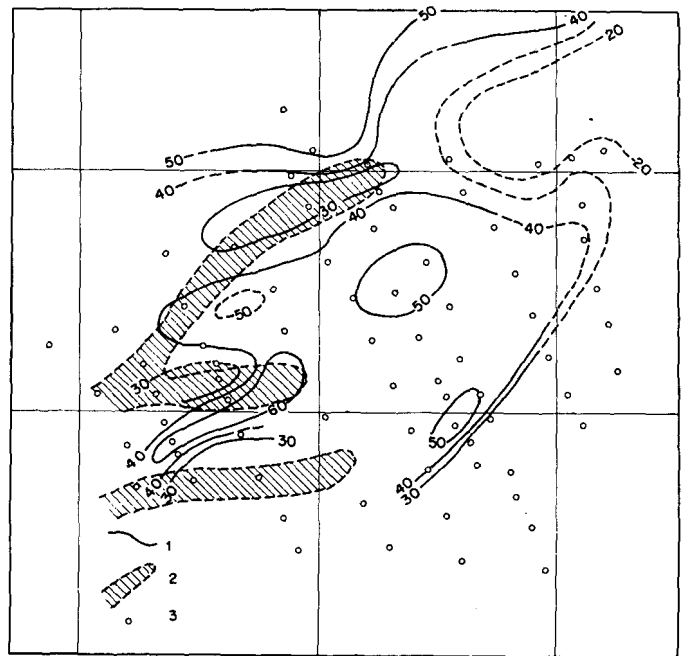
Veamos otro ejemplo de interpretación cualitativa de curvas de SEV, que permite fijar las zonas en que se intercalan en el corte horizontes de alta resistividad. Por el análisis de las curvas de SEV efectuadas en un área de exploración en Pskov (zona de Porjov) se estableció qué puntos de SEV se disponen en los afloramientos de las diferentes capas (burenskica, il'menskica, svinordskica, shelonskica) del complejo calizo del Devónico superior. Por el estudio de la posición del punto $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV se puede concluir que la resistividad de todas estas capas, como regla general, oscila entre 60 y 150 ohm.m. Sin embargo, en alguno de los sectores de la zona se observan curvas de SEV con un acusado aumento de ordenada de $\bar{\rho}_{max}$ lo que indica una subida de la resistividad del paquete calizo hasta 400-500 ohm.m, así como una variación de la forma general de la curva en comparación la predominante en la mayor parte de las curvas (figura 276 a y b).

Fig. 276.— Formas diferentes de curvas de SEV en función de las particularidades del corte. Zona de Porjov en la región de Pskov.



La fase de estudio siguiente puso de manifiesto que los puntos de SEV en que aparecían estas gráficas se disponían regularmente en zonas de hundimiento local de la capa shelonskica (fig. 277). La presencia de curvas anormales de SEV en las zonas indicadas se explicó por la existencia en las áreas de flexión de la capa shelonskica de lenjetones de yesos o de estratos de arcillas fuertemente yesíferas. Para confirmar esta hipótesis sirvió también la comparación de las curvas de SEV obtenidas en un mismo punto (SEV 30 y 31) de la zona anómala, realizadas con alineación de electrodos

Fig. 277.—
Interpretación
cualitativa de
curvas de SEV
que pone de
manifiesto las
áreas de
desarrollo de
sedimentos
yesíferos. Zona de
Porjov, región de
Pskov. (por K. P.
Mitrofanov).
1.—Isohipsas por
el techo de la
capa Shelonski
del Devónico
superior;
2.—Zonas en que
según los datos
de SEV se marca
un horizonte de
resistividad alta
en la parte
superior del corte
(capa yesífera);
3.—Puntos de
SEV.



perpendiculares entre sí (fig. 278). La curva de SEV con alineación de electrodos de azimut 10° tiene un máximo de $\bar{\rho}$ más acentuado y una caída más fuerte de la rama derecha descendente que la curva con alineación de azimut 110° . Se observa que la forma distinta de las curvas de SEV evidencia que la línea de electrodos corta, para una cierta posición de AB, al contacto de la roca de alta resistividad con la roca relativamente conductora. Estas curvas de SEV indican en el punto en cuestión la dirección en que se extiende la roca de alta resistividad, por la alteración del curso de las gráficas de SEV de la que consideramos normal para la región investigada.

La interpretación cualitativa de las curvas de SEV de capas múltiples da a veces excelentes resultados en el estudio del paleorelieve. Es muy interesante por ejemplo la información obtenida en la exploración eléctrica de la región petrolífera de Buguruslan y Tartaria Meridional. Mediante el análisis de las curvas de SEV y los planos de tipo de curvas se delimitó una

Fig. 278.—Curvas
de SEV obtenidas
con alineaciones
de electrodos
perpendiculares
entre sí y que
indican la
extensión
probable de las
intercalaciones
yesíferas (por
K. P. Mitrofanov).
Zona de Porjov,
región de Pskov.

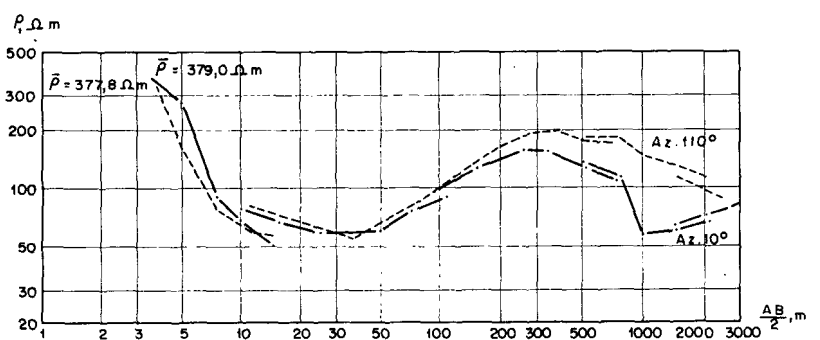
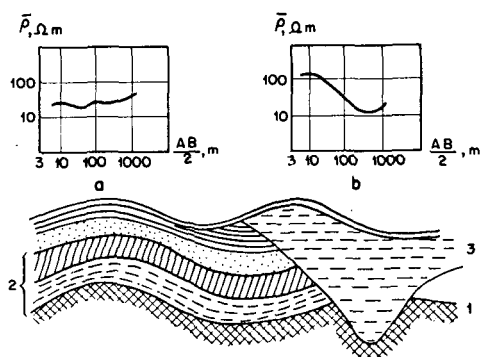


Fig. 279.—
 Interpretación
 cualitativa de
 curvas de SEV de
 capas múltiples,
 que sitúa una
 zona de
 derrubiamiento
 preakchagyl'skico
 en sedimentos
 pérmicos. Región
 de Buguruslansk.
 1.—Superficie del
 horizonte de
 apoyo de alta
 resistividad
 (Capas yesíferas de
 la sedimentación
 Kazanskica);
 2.—Sedimentos
 del periodo
 Pérmico;
 3.—Sedimentos
 de edad
 akchagyl'skica.



extensión de dolinas fósiles cubierta por una capa potente conductora akchagyl'skica formada por derrubios de la superficie de rocas de edad pérmica. La zona de acumulación de los depósitos akchagyl'skicos, coincidente con la de derrubiamiento intenso preakchagyl'skico, se caracterizaba por una variación acusada del aspecto de las curvas de SEV (fig. 279 a y b):

Veamos la investigación del corte eléctrico. El mismo presenta rocas cuaternarias, terciarias y del Pérmico superior (pisos Tártaro y Kazanskico). Como horizonte de apoyo se tienen aquí sedimentos de alta resistividad —paquete de rocas yesíferas de la parte superior del piso Kazanskico— junto con rocas poco conductoras que yacen a mayor profundidad. La mayoría de las curvas de SEV tienen aspecto de curvas de cinco capas de tipo HKHK (fig. 279 a). Junto a estas curvas de SEV, normales en la región de exploración, se tienen otras áreas con curvas de aspecto totalmente distinto (fig. 279 b). Se caracterizan por una caída monótona de hasta valores muy bajos relacionados con un paquete conductor potente existente debajo de los aluviones. Los datos de perforación y testificación en algunos puntos señalaron que este paquete está formado por rocas arcillosas akchagyl'skicas de escasa resistividad (hasta 6-5 ohm.m. y más bajo) y la exploración eléctrica puso de manifiesto, en la zona de derrubiación preakchagyl'dica (profundidad 200 a 250 m), sedimentos pérmicos en grandes extensiones y en diferentes áreas de toda la región. Los resultados de los sondeos mecánicos confirmaron posteriormente las conclusiones de la exploración eléctrica.

Se podrían citar innumerables ejemplos sobre planos de tipo de SEV y de resistividad, cortes de resistividad, planos de variación de la posición de los puntos extremos y otros documentos de interpretación cualitativa de curvas de SEV de

capas múltiples que dan un material valioso para el estudio de los rasgos geológicos generales de la estructura de una región y su variación con la del corte eléctrico.

La interpretación cualitativa de las curvas de SEV también en el caso de cortes de capas múltiples, permite aclarar problemas de interés práctico para la exploración. Sin embargo no hay que perder de vista que cuanto más complejo es el corte eléctrico tanto menos ciertos pueden ser los resultados de la interpretación. En tales condiciones la interpretación cualitativa del material de la exploración eléctrica no conduce a conclusiones geológicas exactas.

5

INTERPRETACION PRACTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS SEV

El método de SEV que se viene aplicando en la industria petrolífera desde hace más de veinte años, ha servido para investigar amplias extensiones de la Unión Soviética en las condiciones geoelectricas más diversas. La exploración eléctrica se utiliza corrientemente en la región petrolífera Uralo-Volga, en las regiones centrales y del Noroeste de la Plataforma rusa, en Bielorrusia, en Ucrania, en Asia Central, regional siberianas y en el Sajalín. Los trabajos de prospección eléctrica han contribuido al descubrimiento de yacimientos de petróleo y gas en Bashkir, región petrolífera de Bururustán, Saratov y Stalingrad del Volga, Ucrania y otras regiones.

Lo normal es que sirvan como horizonte eléctrico de apoyo en el método de investigación por SEV rocas de alta resistividad. En la región de la Plataforma rusa se observan diferentes horizontes de apoyo en la exploración eléctrica: De sedimentos del sistema Pérmico (rocas yesíferas de la parte inferior del piso tártaro y parte superior del piso kazanskico, sedimentos hidroquímicos del piso kungurskico, calizas y dolomías del piso artinskico); del Carbonífero (principalmente paquetes calizos del Carbonífero medio e inferior); del sistema Devónico (sedimentos yesíferos de la parte superior del piso famenskico). El horizonte de apoyo más profundo de elevada resistividad corresponde a las rocas cristalinas del basamento precámbrico.

Horizontes de apoyo eléctricos formados por capas de baja resistividad dentro de los límites estudiados por el método de SEV en la plataforma rusa son relativamente raros. En la mayoría de los casos se manifiestan poco seguros, ya que sus límites pueden desplazarse dentro del corte variando su fijación estratigráfica. Por ello se suele llevar la investigación hasta horizontes de alta resistividad y sólo en los casos en que para conseguir esto último hay que aumentar la separación de electrodos AB hasta límites técnicamente irrealizables, se limita la exploración hasta horizontes de apoyo conductores.

En las regiones meridionales de la Unión Soviética, donde existen potentes formaciones de sedimentos terciarios, sirven de horizonte de apoyo eléctrico los sedimentos conductores pliocenos (península Apsheronck) miocenos y oligocenos (territorios de Krasnodar).

42. Análisis de las curvas de SEV efectuadas junto a sondeos mecánicos. Cálculo de la situación estratigráfica del horizonte de apoyo.

Ante todo nos detendremos en algunos ejemplos prácticos de análisis de curvas de SEV en comparación con los resultados de sondeos mecánicos y testificación de los mismos. Como sabemos, este análisis junto con la interpretación cualitativa de los resultados de la exploración eléctrica precede siempre a la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV. El mismo persigue el objetivo de lograr la más exacta división del corte en horizontes geoelectricos separados, fijar la valoración de sus parámetros y calcular la situación estratigráfica del horizonte de apoyo.

Sea una curva de SEV (fig. 280, curva a) realizada próxima a un sondeo mecánico, cuyo corte estratigráfico y resultados de diagrama de testificación se presenta en la tabla 56 y figura 281. Este ejemplo pertenece a una de las investigaciones efectuadas en la parte Noroeste de la Plataforma rusa y copiado de A. M. Zagarmistr.

El corte geoelectrico, como pone en evidencia la interpretación de los resultados de la testificación, presenta gran número de capas con diversos parámetros. En cuanto a la curva de SEV; que se ha llevado hasta una separación $AB = 10$ km, a juzgar por su aspecto refleja sólo un corte de cinco capas de tipo KQH con horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande. El valor de la conductancia longitudinal total S del conjunto del paquete sedimentario y obtenido directamente del impreso de la curva de SEV es de 80 mho. El cálculo de S por la diagrafía (sonda normal de gradiente) da $S = 70$ mho. Esto permite afirmar con toda seguridad que como horizonte de apoyo eléctrico en el punto de SEV sirven las rocas cristalinas precámbricas, que están situadas a una profundidad de 524 m. De este modo la cuestión de la coincidencia estratigráfica con el horizonte de apoyo se soluciona en este caso fácilmente.

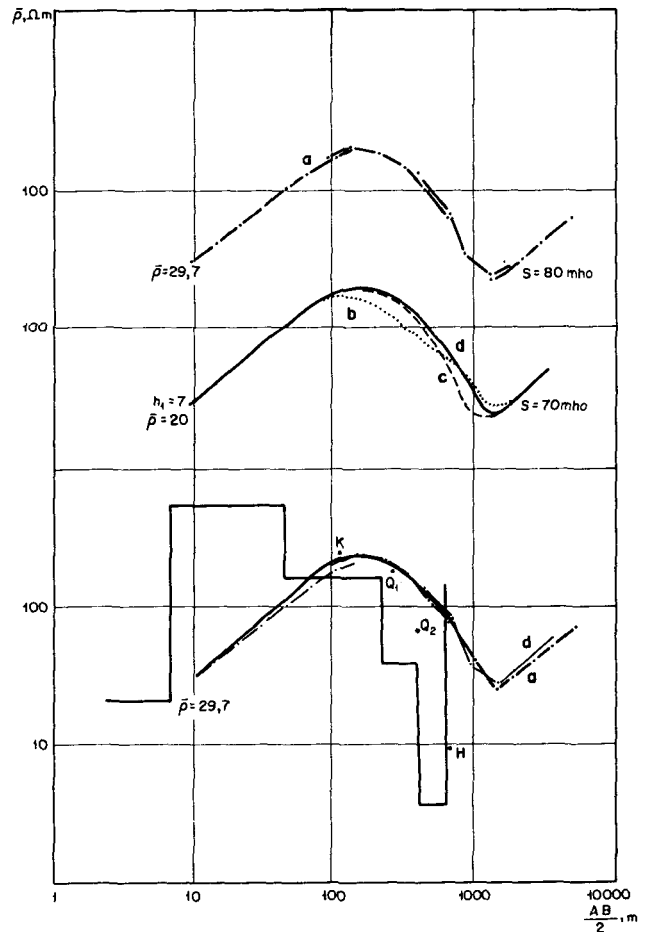


Fig. 280.—
Curva práctica
de SEV y
reproducción
gráfica de la
misma según los
resultados de la
interpretación de
los datos de
testificación del
sondeo mecánico
(según A. M.
Zagarmistr).

La curva de SEV indica claramente que bajo un horizonte superior relativamente conductor (aluviones de escasa potencia) se encuentra una capa de alta resistividad

($abc \cdot \bar{\rho}_{max} = 210$ ohm.m). El mismo está relacionado con rocas carbonatadas de las capas Pskov-Chudovo, que se caracterizan por la resistividad media $\rho_m = 278$ ohm.m dada por la diagráfia. Si se toma hasta la base de esta capa una profundidad de 42 m, como indica la diagráfia, o teniendo en cuenta el coeficiente de anisotropía de la capa ($\lambda = 1,13$) 47 m, entonces la valoración de la resistividad de esta capa con ayuda de los ábacos de tres capas de tipo K da $\rho_2 = 500$ ohm.m. Esta será la resistividad media de la segunda capa ρ_m . Después la curva de SEV señala un paquete conductor en su rama descendente. Subdividirlo por la gráfica de SEV es difícil.

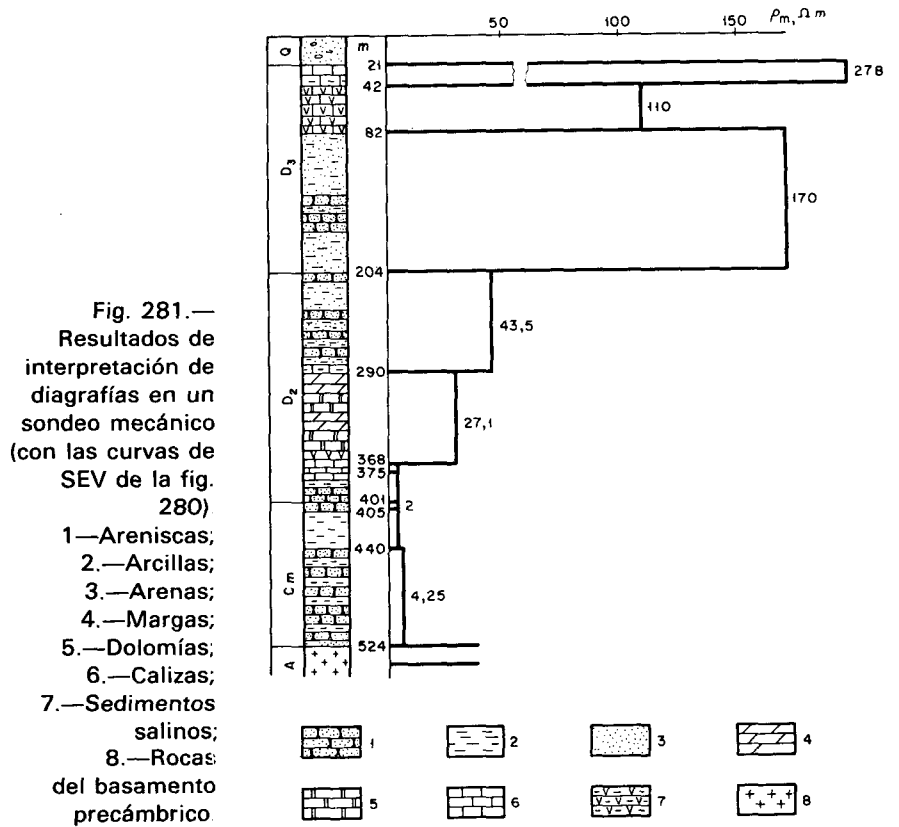
TABLA 56

RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE LA DIAGRAFIA DEL SONDEO MECANICO (SEGUN A. M. ZAGARMISTR); SONDA M 2,5 A 0,5 B

Características estratigráficas del corte		Intervalos de profundidad (m)	Características litológicas	Mineralización de las aguas (1)	S (mho)	ρ_t (Ω m)	ρ_l (Ω m)	ρ_m (Ω m)	λ
Devónico superior	Capa Pskov-Chudovo	21-41	Calizas dolomitizadas	No hay datos	0,1	316	244	278	1,13
	Capa Snetogor	42-81	Las mismas	Débil	0,5	162	75	110	1,47
	Capa Infra-Snetogor	82-204	Arenas con algunas arcillas intercaladas	Elevada	0,7	172	169	170	1,01
Devónico medio	Capa Tartu	204-288	Arcillas y arenas alternantes	Elevada	2,1	48	39	43,5	1,11
	Capa Narov	290-367	Paquete margo-dolomítico-arcilloso ocasionalmente con inclusiones de yeso	Elevada y alta	3,2	30	24,5	27,1	1,10
Cámbrico inferior	Capa Piarnu	368-400	Areniscas	Alta	16,9	2,0	2,0	2,0	1,0
	Capa Supra-Liaminaritov	401-404	Areniscas con arcillas intercaladas	Alta	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
	Capa Liaminaritov	405-439	Arcillas	Alta	17,5	2,0	2,0	2,0	1,0
	Capa Gdov	440-524	Areniscas con arcillas intercaladas	Alta	25,2	5,40	3,34	4,25	1,27
Profundidad del basamento cristalino (Precámbrico)		524			70	80,5	7,2	24	3,36

(1) Mineralización débil de las aguas, hasta 2 gr/litro; elevada, hasta 20 gr/l; alta, hasta 100 gr./l.

Para ver la cantidad de horizontes eléctricos en que puede ser subdividido el paquete relativamente conductor anterior del citado corte, consideramos algunas variantes posibles reuniendo los subconjuntos estratigráficos en capas eléctricas y calculando sus parámetros mediante la ayuda de la diagráfia. Trazando a continuación la correspondiente curva de SEV para cada una de esas variantes y comparándolas con la curva dada de SEV se puede deducir cuál es el más probable corte geoelectrico en el punto dado que se investiga.



En el ejemplo, los parámetros de las dos capas superiores del corte, hallados por los resultados de la interpretación de la curva de SEV, son los mismos para todas las variantes: $h_1 = 7$ m; $\rho_1 = 20$ ohm.m; $\lambda h_2 = 40$ m; $\rho_{2m} = 500$ ohm.m. Se ve claramente que en la primera variante el paquete complejo conductor consta de dos horizontes eléctricos: En uno existen sedimentos de resistividades relativamente altas y bajas de la capa Snetogor hasta Narov inclusive y en el otro rocas muy conductoras de la capa Piarnu y de todo el Cámbrico. Al calcular los parámetros del corte geoelectrico obtenemos en este caso los resultados siguientes:

Capa	h (m)	ρ_m (ohm.m)	λ	λh (m)
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	326	73	1,42	463
4	156	3,12	1,24	193
5	∞	∞	—	—

$$\Sigma h = 524 \text{ m} \quad S = 70 \text{ mho}$$

$$\Sigma \lambda h = 703 \text{ m}$$

En la figura 280 (curva b) se tiene la curva de SEV construida con estos parámetros (λh y ρ_m). Como vemos la primera suposición de que el corte eléctrico tiene cinco capas no satisface a la realidad de la curva de SEV observada.

Supongamos ahora que el complejo de rocas relativamente conductoras señalado por la rama descendente de la curva de SEV está formado por dos horizontes eléctricos: las capas

Snetogor e Infra-Snetogor de relativamente alta resistividad; y todas las capas infrayacentes de baja y muy baja resistividad. Conforme a esta segunda variante de combinación de capas, obtenemos:

Capa	h (m)	ρ_m (ohm.m)	λ	λh (m)
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	162	148	1,14	185
4	320	10,2	2,15	690
5	∞	∞	—	—

$$\Sigma h = 524 \text{ m} \quad S = 70 \text{ mho}$$

$$\Sigma \lambda h = 922 \text{ m}$$

En la figura 280 (curva c) se ha representado la curva de SEV hallada para estos parámetros. Su comparación con la curva de SEV experimental evidencia ya una aproximación considerable con ella. Sin embargo, se diferencian visiblemente en la marcha de la rama descendente. En vista de ello consideremos una tercera variante de combinación de capas.

Suponemos que la rama descendente de la curva de SEV corresponde a tres horizontes eléctricos: el complejo de las capas Snetogor e Infra-Snetogor; capas Tartu y Narov; capa Piarnu y Cámbrico. El cálculo de los parámetros mediante el diagrama de testificación nos da el siguiente corte de seis capas:

Capa	h (m)	ρ_m (ohm.m)	λ	λh (m)
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	162	148	1,14	185
4	164	34,7	1,13	186
5	156	3,12	1,24	193
6	∞	∞	—	—

$$\Sigma h = 524 \text{ m} \quad S = 70 \text{ mho}$$

$$\Sigma \lambda h = 611 \text{ m}$$

La gráfica de SEV construida para la tercera variante (fig. 280, curva d) coincide bien con la curva de SEV observada. Por consiguiente lo más exacto es considerar el corte eléctrico como de seis capas de tipo KQQH. Como vemos la resistividad de los diversos horizontes eléctricos va disminuyendo regularmente con la profundidad. El estudio desde el punto de vista hidrogeológico e hidroquímico del corte lleva a la conclusión de que dicha disminución está relacionada estrechamente con la distribución zonal de las aguas subterráneas en función de su grado de mineralización. A. M. Zagarmistr ha señalado que los límites de separación entre los horizontes 3 y 4, 4 y 5 están relacionados con capas acuifugas mientras que los límites más bajos (acuifugo de las capas inferiores Narov) presentan un fuerte aumento en la mineralización de las aguas que saturan las rocas ligadas con resistividades bajas.

Definido de este modo, con ayuda de los datos de perforación y testificación, el carácter más probable del corte eléctrico examinado y las resistividades paramétricas de sus capas, en la interpretación de las curvas de SEV próximas a sondeos mecánicos debe hacerse uso de los valores de estos parámetros. En caso de que la forma de las curvas de SEV cambie poco, ello puede servir como signo de constancia del corte eléctrico (aunque a veces ello no es verdad debido a ser aplicable el principio de equivalencia) tomándose en este caso los valores de los parámetros como invariables en la mayor parte o en toda la zona explorada.

En la interpretación de las curvas de SEV se pueden utilizar los valores hallados de ρ_m , pero en ese caso, el espesor obtenido para cada capa debe disminuirse en λ veces, es decir se debe dividir el espesor de cada capa por su correspondiente coeficiente de anisotropía. En la práctica se puede proceder de modo más sencillo: Como resistividades paramétricas de las capas se toman los valores de ρ_i si la parte de la curva de SEV que se interpreta es del tipo H o A y ρ_i en caso de que sea de los tipos K o Q. En tal caso los valores del espesor de las capas que se obtienen en el proceso de la interpretación no son exagerados. Es fácil comprobar que en el ejemplo examinado (variante tercera) los valores de $\rho_i = \rho_m / \lambda$ y $\rho_i = \rho_m \cdot \lambda$, serán los siguientes:

Capa	h (m)	ρ_i (ohm.m)	ρ_i (ohm.m)
1	7	20	20
2	35	440	560
3	162	129	170
4	164	30,7	39
5	156	2,51	—

$$\Sigma h = 524 \text{ m}$$

$$S = 70 \text{ mho}$$

Por consiguiente, por el tipo de corte y en función de la interpretación de la curva de SEV dada y también para las semejantes a ella, en la zona explorada se tomarían las siguientes resistividades paramétricas: $\rho_2 = 560$ ohm.m, $\rho_3 = 170$ ohm.m, $\rho_4 = 39$ ohm.m, $\rho_5 = 2,51$ ohm.m. Teniendo en cuenta que para la curva observada de SEV es $S = 80$ mho, tan sólo debe corregirse algo el valor del parámetro ρ_i del quinto horizonte. La conductancia longitudinal total de las cuatro capas superiores del corte para las resistividades paramétricas dadas es igual a:

$$S_{1-4} = \frac{7}{20} + \frac{35}{560} + \frac{162}{170} + \frac{164}{39} = 5,6 \text{ mho}$$

De aquí $S_5 = 74,4$ mho y el valor ρ_i de la quinta capa (capa Piarnu y sedimentos cámbricos) debe tomarse igual a

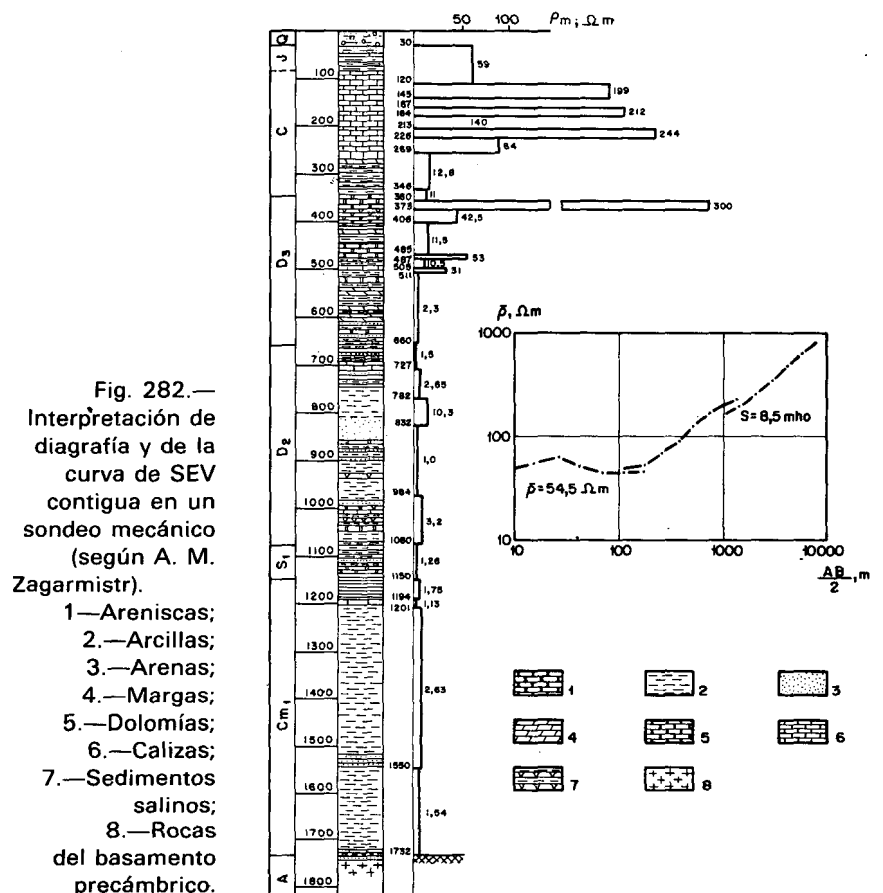
$$h_5 / S_5 = 156 / 74,4 = 2,1 \text{ ohm.m.}$$

En la interpretación de la rama descendente de las curvas de SEV del tipo examinado, muy rara vez se logran definir tres horizontes conductores. En el mejor de los casos el curso de la curva de SEV permite subdividir el paquete conductor sólo en dos capas. En este caso deben englobarse en una, dos de las capas conductoras y calcular la correspondiente resistividad paramétrica media. La construcción gráfica de la curva de SEV por los datos de la testificación en el caso del ejemplo anterior, demuestra que la curva de SEV observada encaja mejor con la solución de unir en un horizonte los 4 y 5 que los 3 y 4. Hallemos la resistividad paramétrica media (longitudinal) de las capas 4 y 5 en que debe basarse la interpretación. El valor $\rho_{4,5}$ puede calcularse por la expresión $h_4/\rho_4 + h_5/\rho_5 = (h_4 + h_5)/\rho_{4,5}$. Sustituyendo valores, hallamos $164/39 + 156/2,1 = 320/\rho_{4,5}$. De aquí $\rho_{4,5} = 4,1$ ohm.m.

Por consiguiente, el análisis de la curva de SEV al compararla con los datos de la perforación y testificación muestra que para interpretar la gráfica de SEV dada como de cinco capas hay que partir de los siguientes valores de los parámetros: $\rho_2 = 560$ ohm.m, $\rho_3 = 170$ ohm.m, $\rho_{4,5} = 4,1$ ohm.m.

A veces la curva de SEV hallada mediante los resultados de interpretación de las diagráfias normal y STL no tiene nada en común con la gráfica del SEV realizado junto al sondeo mecánico. Veamos uno de tales casos.

En la figura 282 se tiene el diagrama que caracteriza la variación del valor de ρ_m para un sondeo perforado en la parte



Noroeste de la Plataforma Rusa y la curva de SEV (con separación AB=16 km) junto a dicho sondeo.

Los materiales de los paquetes sedimentarios se subdividen, según los valores de la resistividad, en tres complejos. La parte superior del corte hasta 269 m de profundidad está formado por rocas de edad cuaternaria y carbonífera de gran resistividad en general (ρ_m de 40 a 244 ohm.m). De 269 a 511 m, se tiene una capa (Carbonífero inferior y parte alta del Devónico superior) de resistividad baja en general (ρ_m de 10 a 13 ohm.m); sin embargo, dentro de esta zona se encuentran también capas de resistividad (por los resultados del STL) igual a 300 ohm.m. Posteriormente, hasta una profundidad de 1732 m, en que la perforación alcanza el basamento cristalino, los sedimentos (devónicos, silúricos y cámbricos) se caracterizan por una resistividad pequeña (de 1 a 3 ohm.m).

La curva de SEV (fig. 283), para una subdivisión suficiente del corte geoelectrico, se construye gráficamente mediante los siguientes datos de interpretación de la diagráfia:

Capa	h (m)	ρ_m (ohm.m)	λ	λh (m)
1	120	60	1,0	120
2	25	200	1,19	30
3	22	98	1,04	23
4	17	212	1,03	17,5
5	29	40	1,0	29
6	13	244	1,13	15
7	43	84	1,13	49
8	21	12,7	1,07	28
9	13	300	1,0	13
10	1359	3,03	1,69	2160
11	∞	∞	—	—

$\Sigma h = 1732$ m

$\Sigma \lambda h = 2554$ m

Como se ve, la curva construida del sondeo tiene un aspecto totalmente distinto de la gráfica experimental de SEV. Esta última pone de manifiesto en el corte, dos horizontes de alta resistividad separados entre sí de modo poco claro por un paquete conductor. La construcción gráfica da una curva de SEV que señala claramente (para la misma separación AB=16 km) un paquete de baja resistividad y el horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande.

Interpretemos la curva práctica de SEV reproduciendo el método de su construcción gráfica, es decir, tomando las resistividades paramétricas tales que nos llevan a resultados que hagan reproducir de modo óptimo el curso de la curva. Se concluye fácilmente mediante tal interpretación que el horizonte superior de alta resistividad está ligado a las calizas carboníferas; sin embargo su resistividad media es mucho más alta ($\rho_m = 5000$ ohm.m) que la indicada por la testificación. Sobre esta capa, de unos 130 m de espesor, descansan sedimentos relativamente conductores carboníferos, jurásicos y aluviones con un espesor total de

unos 140 m. El valor de la conductancia longitudinal total tomada de la curva experimental de SEV es en total de $S=8,5$ mho. Comparándola con los datos de la interpretación de la diagrafía STL, hay que pensar que el segundo horizonte de alta resistividad señalado en la curva de SEV presenta probablemente intercalaciones yesíferas cerca del techo de las capas Dankov-Lebedian del Devónico superior; la conductancia longitudinal total calculada de estas intercalaciones es $S=11$ mho. Según los datos de la perforación y testificación del sondeo mecánico, el techo de las intercalaciones yesíferas se encuentran a 360 m de profundidad. El espesor obtenido es de 13 m, y la resistividad de este horizonte de apoyo mediante la reproducción de la curva de SEV, se puede estimar en unos 10^6 ohm.m, frente a los 300 ohm.m indicados por el STL. En cuanto a la resistividad del paquete conductor que descansa sobre las intercalaciones yesíferas, se debe tomar igual a 15 ohm.m para poder ajustarse al curso de la curva de SEV.

Por tanto, la curva que coincida satisfactoriamente con la experimental corresponderá al corte eléctrico siguiente (fig. 283).

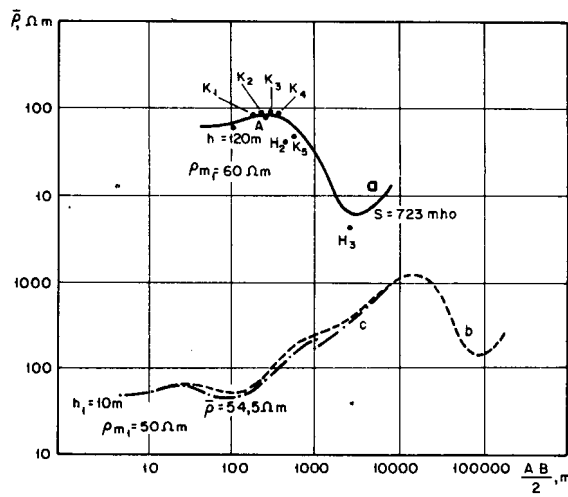
Capa	ρ_m (ohm.m)	h (m)	Características estratigráficas y litológicas
1	50	10	Aluviones
2	100	10	
3	40	120	Sedimentos jurásicos del Carbonífero superior y de parte del Carbonífero medio.
4	5000	130	Calizas y dolomías del Carbonífero medio e inferior.
5	15	90	Sedimentos del tramo terrígeno del Carbonífero inferior y parte alta de las capas Dankov-Lebedian del Devónico Superior.
6	10^6	13	Yesos intercalados en la parte alta de las capas Dankov-Lebedian.

El ejemplo examinado atestigua que no siempre se señalan en las diagrafías normales y STL los horizontes de poco espesor y muy alta resistividad intercalados entre sedimentos conductores, o dan un valor reducido de la resistividad que no es utilizable en la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV.

En el caso citado, las interestratificaciones yesíferas de 13 m de espesor y unos 10^6 ohm.m de resistividad, hacen de

Fig. 283.—Curva de SEV construida gráficamente por los resultados de interpretación de los diagramas de testificación y mediante selección de los parámetros (según A. M. Zagarmistr).

- a.—Curva de SEV hallada por los datos de interpretación de las diagraffias;
- b.—Curva de SEV obtenida gráficamente mediante selección de los parámetros para la parte superior del corte;
- c.—Curva práctica de SEV.



horizonte pantalla. A causa de ello la profundidad alcanzada por la investigación eléctrica es reducida (unos 400 m) en proporción a la separación alcanzada de $AB = 16000$ m; el paquete que yace debajo, formado por sedimentos conductores de más de 1300 m de espesor no se refleja en la curva de SEV para esta separación. Mediante la construcción gráfica se puede demostrar (fig. 283) que para el cálculo de la profundidad de la superficie del basamento cristalino serían necesarias en el caso considerado separaciones AB del orden de 400 km. Es evidente que la región indicada es totalmente desfavorable para la exploración del basamento precámbrico por el método eléctrico. En el mejor de los casos el método de SEV puede servir aquí sólo para estudiar la posición de la superficie de los sedimentos yesíferos de la parte alta del Devónico Superior.

Consideremos el ejemplo de cálculo de la situación estratigráfica del horizonte de apoyo de alta resistividad para el caso de una investigación poco profunda en la región del Kam del Ural.

El corte geoelectrico del terreno, dentro de los límites de la profundidad estudiada, se puede calcular del modo siguiente. Bajo aluviones de poco espesor yace un paquete heterogéneo relativamente conductor de sedimentos arenisco-arcillosos de edad kazanskica y espesor hasta 250 m. En la parte superior de la misma se encuentra una capa de yeso de 3 a 5 m de espesor; según los datos de testificación la resistividad de esta capa es de unos 500 ohm.m. Los sedimentos del piso Kazan se extienden debajo de rocas del piso Kungar que en la parte alta de la capa (50 a 60 m) presentan paquetes dolomítico-calizos de resistividad baja y en la parte baja preferentemente espesores de hasta 30 a 50 m de anhidrita

con resistividades, según los datos de la testificación, de más de 500 ohm.m. Debajo de la capa de anhidrita se encuentra un paquete de calizas de edad artinskica.

Para la interpretación de la diagrafía del pozo de exploración, el corte fue agrupado en cuatro horizontes eléctricos: 1) aluviones y sedimentos conductores del piso Kazan; 2) capa yesífera de esta misma edad; 3) paquete relativamente conductor de la parte baja del piso Kazan y superior del Kungur; 4) anhidritas del piso Kungur.

En la figura 284 se presentan dos curvas de SEV pertenecientes a esta zona. La rama derecha de ambas curvas indica un horizonte de resistividad muy alta. Esta rama, a pesar de su inclinación en la parte final, para la separación dada AB admite trazar la posición de la asíntota inclinada 45° con el eje de abscisas y hallar el valor de S: para el SEV 1, $S=2,5$ mho, para el SEV 2, $S=7,3$ mho. Surge la pregunta de cuál es la coincidencia estratigráfica de los sedimentos de relativamente alta resistividad que refleja la rama ascendente de las curvas de SEV. ¿Están relacionados con la pequeña capa de yeso existente en los sedimentos del piso Kazan o con los más potentes de anhidrita que existen más abajo? La solución exacta a tal problema juega un papel importante para la interpretación geológica de las curvas de SEV. Para contestar a la misma normalmente se recurrirá a los resultados de la interpretación de diagrafías de sondeos mecánicos. La comparación de los valores S calculados por los datos de la testificación para los diferentes horizontes de alta resistividad con los valores de la conductancia longitudinal total obtenidos en la curva de SEV realizada junto a estos sondeos mecánicos, permite solucionar el problema en la mayoría de los casos.

TABLA 57

RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE DIAGRAMAS DE TESTIFICACION

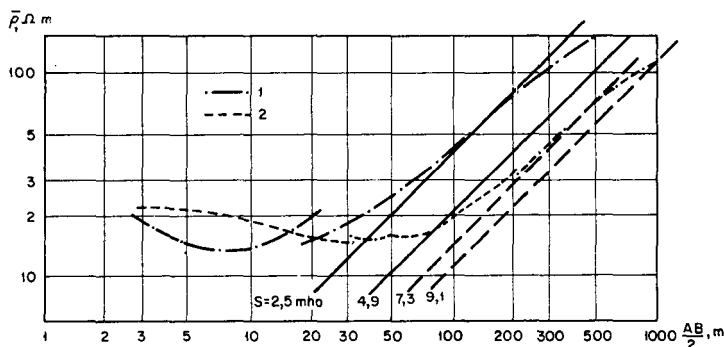
Punto de SEV	Número del pozo	Aluviones y sedimentos conductores del piso kazanskico					Capa de yeso del piso kazanskico		Sedimentos conductores del Kazan inferior y Kungur superior					Totales		Anhidrita del Kungur	
		h (m)	S (mho)	ρ_t (ohm.m)	ρ_l (ohm.m)	ρ_m (ohm.m)	h (m)	ρ_m (ohm.m)	h (m)	s (ohm.m)	ρ_t (ohm.m)	ρ_l (ohm.m)	ρ_m (ohm.m)	h (m)	S (mho)	h (m)	ρ_m (ohm.m)
1	1	27	2,5	12,6	10,6	11,6	5	500	59	2,4	80	25	46	91	4,9	>40	>500
2	2	83	7,3	14,4	11,4	12,8	3,5	500	51	1,8	77	28	46	138	9,1	>40	>500

En la tabla 57 se han indicado los datos de la interpretación en la región considerada de las diagrafías (sondas de gradiente, M2A0, 5B) para ambos sondeos junto a los que se realizaron los SEV 1 y SEV 2.

Como vemos, el valor de S obtenido de las curvas de SEV, corresponde completamente con el hallado por los diagramas de testificación hasta la superficie de la capa delgada de yeso

en los sedimentos de edad kazanskica. Si se señala asimismo en los impresos de SEV las asíntotas por los valores de S calculados hasta la superficie del paquete de anhidrita Kungur, entonces la posición de estas asíntotas no corresponderá a la posición de la rama ascendente de las curvas de SEV (fig. 284). Se puede afirmar que las curvas de SEV en la región investigada tienen la rama ascendente que señala la capa yesífera de los sedimentos del piso Kazan, pero no el paquete de anhidrita de edad Kungur. Esta última sólo se evidenciaría para grandes aumentos de la separación AB de electrodos.

Fig. 284.—Cálculo de la fijación estratigráfica del horizonte de apoyo mediante curva de SEV próxima a un sondeo mecánico (según D. E. Pometun). Kamskoe del Ural.

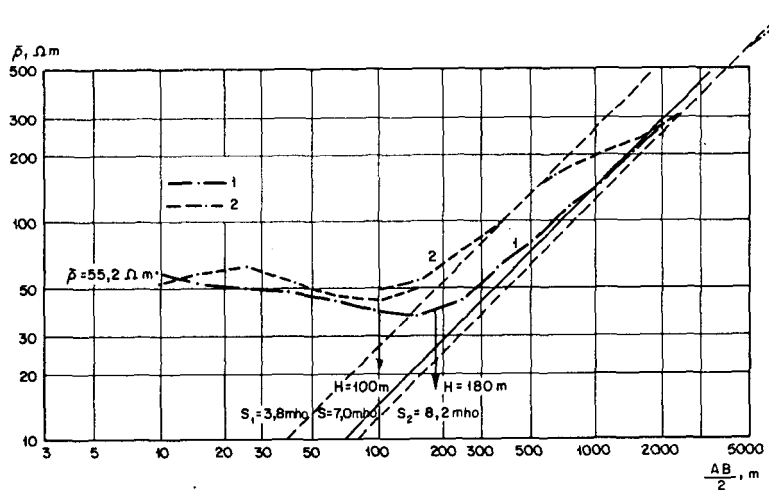


En el ejemplo citado se observa que como horizonte de apoyo de alta resistividad sirve una capa de yeso de escaso espesor (3,5 a 5 m) que yace a más de 80 m de profundidad. La resistividad de esta capa es sin duda mayor que la indicada por los diagramas de testificación. La misma es de al menos 50.000 ohm.m, lo que fácilmente se comprueba mediante la reproducción gráfica de las curvas dadas de SEV. La investigación de campo pone en evidencia que esta capa se señala también a profundidades relativamente grandes (hasta 150 m). Se comprueba que también pueden señalarse en las curvas de SEV como horizontes de apoyo de muy alta resistividad capas aisladas de yeso de 1 a 2 m de espesor aisladas que se presentan hasta 100 a 150 m de profundidad. Esto se refiere no sólo al yeso sino también a cualquier tipo de sedimentos halógenos, si se extienden en forma de estrato continuo en la zona que se explora.

De este modo se llega a una correlación estratigráfica del horizonte de apoyo eléctrico de alta resistividad mediante la comparación del valor de la conductancia longitudinal total calculada por los datos de la testificación (sonda de gradiente) y STL del pozo con los valores de S sacados de las curvas de SEV. Para estratos inclinados menos de 10° a 15° y con ausencia de capas muy delgadas en el corte que no se señalan en las diagrafías así como en cortes homogéneos horizontales, la magnitud de la conductancia longitudinal total del paquete de rocas sedimentarias calculada por los datos de testificación debe coincidir con los valores obtenidos en las curvas de SEV próximas a sondeos mecánicos. Esta coincidencia con uno u otro grado de exactitud se observa para cualquier corte ($\rho_{ha} = \infty$) que presenta capas isótropas o anisótropas alternantes cuya resistividad pueda calcularse por los datos del STL o sonda de gradiente.

Si en la región no existen sondeos perforados, entonces para el cálculo de la posición estratigráfica del horizonte del apoyo deben aprovecharse los datos de perforaciones y testificaciones en zonas colindantes que presenten cortes geológicos análogos. Si incluso esto no es posible, se puede recurrir a los informes de geología general, hidrogeología de otro tipo de la región investigada. En conjunción con la interpretación cualitativa de todo el material de SEV, estos informes normalmente llevan a la solución exacta del problema.

Fig. 285.—
Comparación de
curvas de SEV
con distinta
separación de
electrodos para el
cálculo de la
posición del
horizonte de
apoyo en el corte.
1.—SEV 1;
2.—SEV 2.

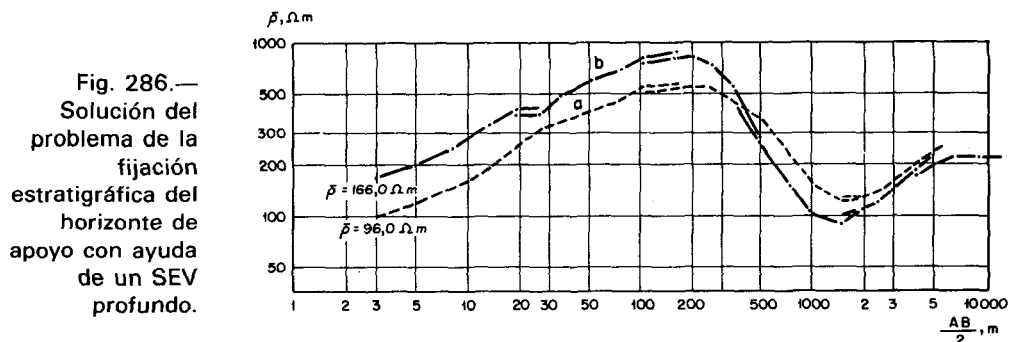


Supongamos por ejemplo que el SEV 1, cuya curva aparece en la figura 285 ha sido realizado en la región en que como horizonte de apoyo de alta resistividad puede presentarse el paquete yesífero de las capas Dankov-Lebedian del Devónico Superior. De la rama derecha ascendente de la curva de SEV, que llega hasta separaciones de $AB=4$ km, se obtiene el valor $S=7$ mho, que no contradice la suposición de la fijación indicada del horizonte de apoyo, desde el punto de vista estratigráfico. Sin embargo, comparando dicha curva con otras curvas de SEV de la región, por ejemplo, con curva de SEV 2 que se ha llevado hasta una separación $AB=16$ km, se advierte que dicha suposición no es exacta. La curva de SEV 2 señala dos horizontes de apoyo de alta resistividad ($S_1=3,8$ mho; $S_2=8,2$ mho). El primero de ellos, a juzgar por los datos generales geológicos de tipo estructural de las regiones colindantes, se puede ligar a paquetes calcáreos del Carbonífero Medio y el segundo con paquetes yesíferos de las capas Dankov-Lebedian. Por consiguiente, también el punto de SEV 1 se debe suponer que la rama ascendente derecha reflejará ante todo la presencia en el corte del paquete de calizas del Carbonífero Medio. El contacto superior de este paquete, como pone de manifiesto una simple comparación cualitativa de las curvas, yace en el punto de SEV 1 relativamente profundo (unos 80 m aproximadamente). A causa de ello disminuye el espesor relativo de la capa conductora que separa ambos horizontes de apoyo y que se señala bastante bien en la curva de SEV 2. La capa conductora, a causa de su espesor relativamente pequeño, no se refleja claramente en la curva de SEV 1 y ambos horizontes de alta resistividad, junto con los paquetes de elevada conductancia que los separan, se manifiestan como

un horizonte de apoyo único. Sería por tanto un grave error suponer para la interpretación de los SEV que la superficie del horizonte de apoyo en el punto de SEV 1 era el techo del paquete yesífero de las capas Dankov-Lebedian.

Por consiguiente la posición estratigráfica del horizonte de apoyo puede calcularse a veces mediante el aumento máximo posible de la separación AB en una serie de puntos de SEV de la región que se investiga.

Un ejemplo interesante de cálculo de la coincidencia estratigráfica del horizonte de apoyo se puede citar en el caso de la exploración eléctrica de la región de los plegamientos Oksko-Kliazminskicos. En ella para separaciones $AB = 10$ km, se obtuvieron curvas de SEV del aspecto indicado en la figura 286 a. La cuestión de la naturaleza del horizonte de apoyo de alta resistividad señalado por la rama final de las curvas de SEV que formaban ángulos de casi 45° con el eje de abscisas no estaba clara. Se suponía que este horizonte estaba relacionado con las rocas cristalinas del basamento precámbrico. El problema fue solucionado con la ayuda de algunos SEV profundos ($AB = 30$ km). Sus curvas indicaron (fig. 286 b) que la rama ascendente en cuestión al aumentar las separaciones tendía a un valor constante. Por consiguiente, la misma no reflejaría las rocas del basamento que poseían una resistividad infinitamente grande. Con ayuda de las testificaciones de un sondeo mecánico profundo realizado en Moscú, donde el corte, según las ideas geológicas generales, es análogo al corte de la región investigada, se estableció que el horizonte de alta resistividad pertenecía a sedimentos yesíferos del Devónico Superior. La rama ascendente de la parte izquierda de las curvas de SEV corresponde a paquetes de rocas carbonatadas compactadas del sistema Carbonífero Superior y Medio; en cuanto al horizonte eléctrico conductor correspondería a sedimentos arenisco-arcillosos del Carbonífero Medio e Inferior y principalmente a rocas carbonatadas de la misma edad saturadas de aguas fuertemente mineralizadas. Estas conclusiones fueron confirmadas posteriormente mediante perforaciones.



43. Ejemplos prácticos de interpretación de curvas de SEV

INVESTIGACION DE ESTRUCTURAS

Región del plegamiento Dono-Medveditskico

La interpretación de las curvas de SEV ejecutadas en esta región fue realizada en los años 1938-1939, pero sin embargo

no ha perdido actualidad como uno de los ejemplos de enfoque exacto de la interpretación de los resultados de SEV en ausencia de sondeos mecánicos profundos y datos de testificación en la región que se examina.

Según lo indicado por el levantamiento geológico, aquí existía un plegamiento de tipo anticlinal de los sedimentos del Carbonífero entre los ríos Don y Medveditsa con eje orientado en dirección NNE-SSO. En la superficie de este plegamiento fue realizada una investigación eléctrica para conseguir una aclaración más amplia de la estructura del pliegue.

Se estudió con el método de SEV y separación de electrodos AB de hasta 8 a 10 km principalmente una superficie de unos 1600 km² con la siguiente red: un punto de SEV cada 2,5 a 3 km² aproximadamente en las zonas de exploración detalladas y cada 10 a 15 km² en las de investigación de reconocimiento. En total se realizaron unos 200 puntos de SEV.

Según las conclusiones del levantamiento geológico que llevaron a la realización de la exploración eléctrica y conjuntamente con ella, la parte superior del corte se identificó según se expone (clasificación estratigráfica del año 1938).

Sedimentos Cuaternarios	— arenas, tierras arcillosas.
Sedimentos Cretácicos	— areniscas, arenas, margas, tierras de moldeo.
Sedimentos Jurásicos	— arenas cuarcíferas, alternancia de arcillas y areniscas.
Sedimentos del Sistema Hullero (tramos Superior y Medio)	— areniscas, arcillas areniscosas, calizas y dolomías compactas.
Tramo Lipov C ₃	— areniscas, arcillas areniscosas; espesor 40 m.
Tramo Lapushen C ₃	— calizas masivas; espesor de 10 a 25 m.
Tramo Shliajov C ₃₋₂	— arcillas; espesor 10 a 25 m.
Tramo Panik C ₃	— calizas compactas; espesor 12 a 25 m.
Tramo Seleznev C ₃	— calizas y dolomías; espesor de 30 a 40 m.
Tramo Sujov C ₂	— calizas masivas a menudo cristalinas; espesor más de 60 m.

Las capas del corte que yacen más profundas no fueron estudiadas entonces.

Para tener una idea de la resistividad de las rocas, el equipo investigador realizó una serie de medidas paramétricas en los afloramientos.

La resistividad de las calizas del tramo Panik que se encontraron fueron elevadas de 600 a 1000 ohm.m (fig. 287, a y b). Las arcillas del tramo Shliajov se caracterizan por resistividades de 10 a 12 ohm.m. Los perfiles paramétricos

realizados acusaron perfectamente la falla (fig. 287, a, b y c) marcada por los resultados del levantamiento geológico. En la figura 287 d, se exponen dos curvas de SEV realizadas en la zona de falla. Las curvas se diferencian bastante entre sí. Si la superficie del horizonte de alta resistividad (de calizas compactas) según los datos del SEV 2 queda a unos 5 m de profundidad, en la zona del SEV 1 yace a profundidad de 30 a 40 m. De esto se deduce que el salto de falla no excede de 35 m. Las curvas de SEV demuestran que debajo de las calizas carboníferas existen potentes paquetes conductores.

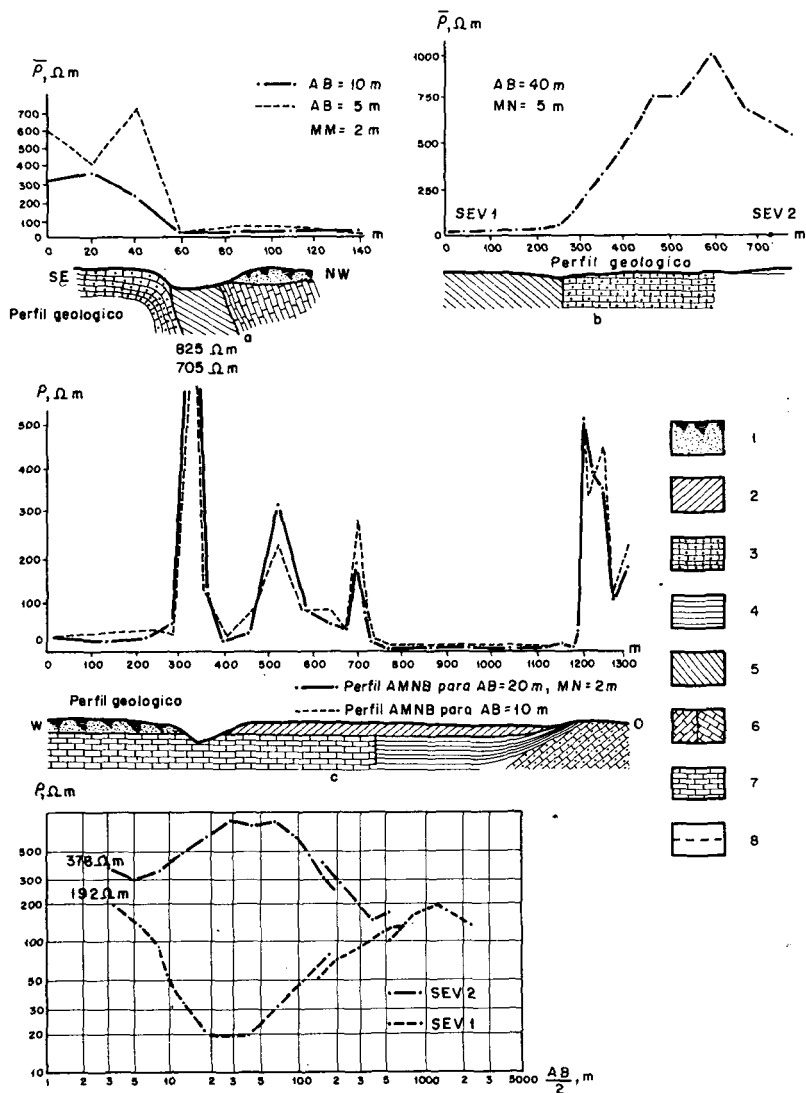


Fig. 287.—
Perfiles eléctricos,
sobre los
contactos de las
calizas y arcillas,
perpendiculares a
su contacto.
(Según B. L.
Gurevich).
1.—Sedimentos
cuaternarios;
2.—Arcillas
jurásicas;
3.—Calizas
Lapunshka;
4.—Arcillas Lipov;
5.—Arcillas
Shliajov;
6.—Calizas Panik;
7.—Calizas
Seleznevo;
8.—Línea de falla.

El perfil paramétrico de la figura 287 c indica que también las calizas del tramo Seleznevo tienen resistividad elevada (700 a 800 ohm.m) así como las del tramo Lapushka (hasta 500 ohm.m). Los sedimentos recientes y jurásicos así como los que se extienden debajo de ellos, las arcillas del tramo Lipov, tienen resistividad relativamente baja (10 a 20 ohm.m).

Las curvas de SEV típicas del terreno explorado, para la separación AB establecida, tienen el aspecto de la gráfica de SEV 75 de la figura 288. Se puede suponer que la misma refleja un corte de cinco capas de tipo KHK. La relación con el corte geológico puede ser la siguiente:

Capa 1, de 10 a 150 ohm.m de resistividad ligada a los sedimentos recientes; el espesor de la capa no excede en general de 25 a 30 m.

Capa 2, de resistividad elevada; a juzgar por el aspecto de las curvas, debe ser de 100 a 300 ohm.m. Refleja probablemente sedimentos profundos del Cuaternario y la facies areniscosa de los sedimentos del Cretácico Superior. El espesor del conjunto varía de 5 a 100 m y más.

Capa 3, tiene resistividad relativamente baja. Este horizonte va ligado a la rama descendente en la que se marca el mínimo de $\bar{\rho}$ en las curvas de SEV. El valor de la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ oscila normalmente entre 200 y 300 m y la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ de 20 a 40-50 ohm.m. La capa 3 corresponde probablemente a sedimentos complejos de tipo arenisco-arcilloso mesozoicos, capas inferiores del Cretácico y sedimentos jurásicos. Probablemente esta capa en caso de derrubiamiento de las rocas paleozoicas presenta también intercalaciones de sedimentos conductores de los tramos Lipov y Shliajovoe del Carbonífero Superior.

Capa 4, posee resistividad alta. Se señala en la mayoría de los casos por la rama ascendente de las curvas de SEV. Esta capa corresponde a un complejo de calizas y dolomías de la parte Superior y Media del Carbonífero, y posiblemente también junto con sedimentos yesíferos del Devónico Superior. La resistividad de esta capa como se ha expuesto anteriormente es del orden de los 1000 ohm.m.

Capa 5, de resistividad baja; se señala en la rama descendente de las curvas de SEV. La correlación estratigráfica de este potente paquete de sedimentos conductores, cuando se estaba realizando el trabajo de prospección eléctrica era difícil de hallar sin tener datos de sondeos mecánicos. Se supuso que esta capa estaba relacionada con sedimentos arenisco-arcillosos del Carbonífero Medio e Inferior.

En algunas curvas de SEV (fig. 288, SEV 154) la subida normal de la rama correspondiente a la capa queda perturbada; las curvas toman de nuevo su aspecto al crecer más $\bar{\rho}$. Se puede suponer que esta forma de las curvas de SEV está acusada por una facies terrígena de los sedimentos del Carbonífero Medio en las zonas en que la capa 4 se aproxima considerablemente a la superficie del terreno. Sin embargo en las zonas de hundimiento de la misma, en las que el espesor relativo de las rocas conductoras es pequeño, todo el conjunto de los sedimentos, incluidos los sedimentos conductores, puede señalarse como una capa 4 de resistividad alta (por ejemplo, SEV 75 en la fig. 288).

Hay que hacer constar que a veces los sedimentos superficiales con resistividad muy alta (arenas cuarcíferas que suelen presentarse en la región estudiada con hasta 3000 ohm.m y más) perturban fuertemente el curso de la rama izquierda de las curvas, llegando al caso de que las capas 1 y

2 indicadas anteriormente se reflejan de modo muy confuso (fig. 288, SEV 87).

La serie de curvas de SEV realizadas, según parece, sobre los sedimentos jurásicos tienen el aspecto de la curva de SEV 4 (fig. 288). Reflejan un corte que comienza sólo en la parte baja de la capa 3. En estos puntos bajo sedimentos conductores (resistividad de 5 a 6 ohm.m) de edad jurásica se presentan rocas de resistividad alta (capa 4).

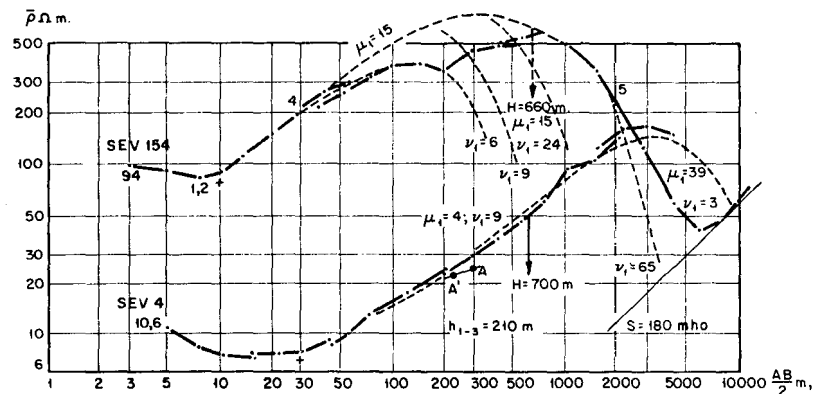
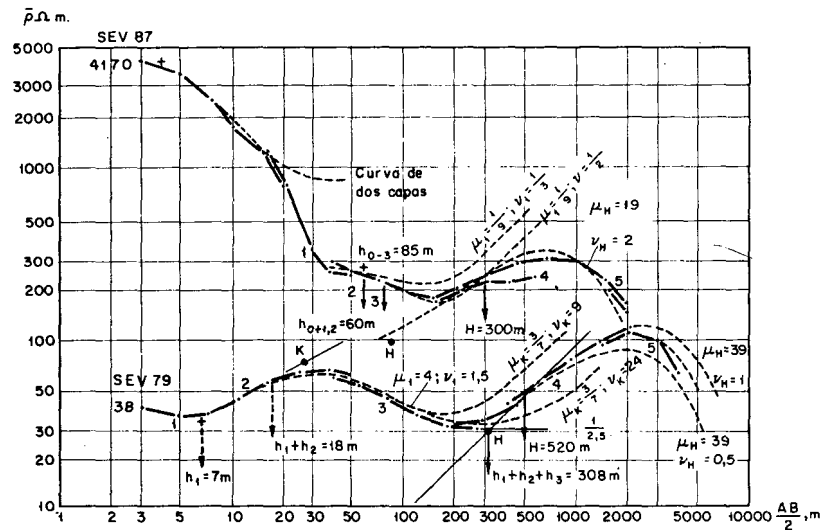


Fig. 288.—
Ejemplos de
curvas de SEV y
su interpretación.
Región
Don-Medveditsa.

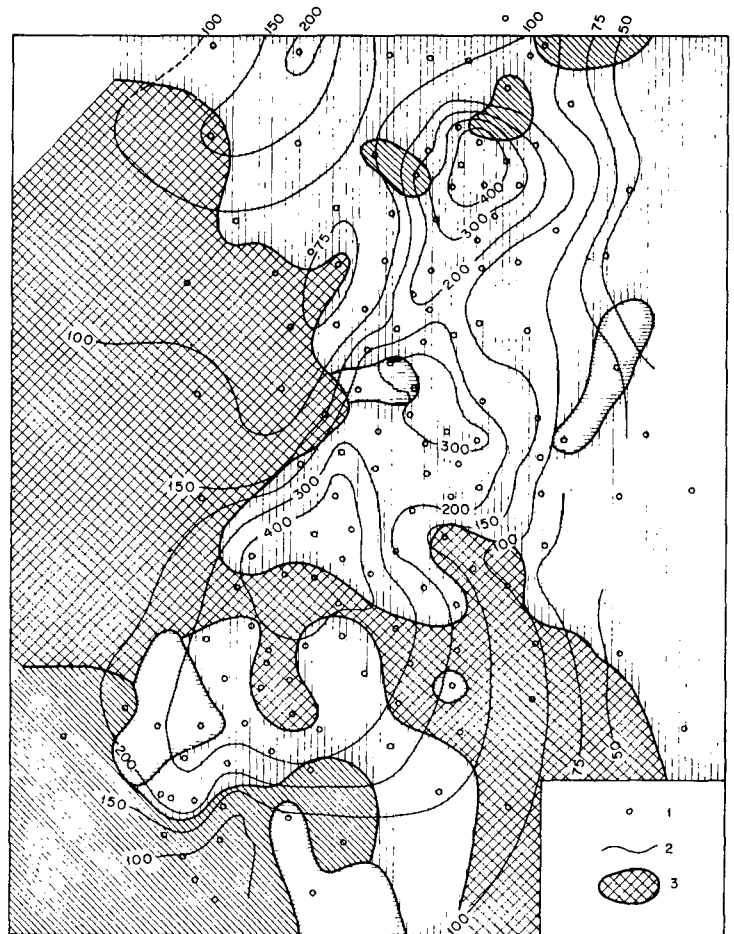
Tal es el corte geoelectrico típico dentro de los límites de la región investigada. Hay que hacer constar también que se hicieron dentro de ella tres SEV profundos de apoyo con separación $AB = 20$ km. Estos fueron los primeros realizados en la exploración eléctrica práctica con separaciones de tal magnitud. Las curvas de SEV profundas presentan una rama derecha que asciende con ángulo de 45° respecto al eje de abscisas (SEV 154 en fig. 288) que refleja un horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande, identificado como correspondiente a rocas cristalinas del basamento profundo. Las abscisas de $\bar{\rho}_{min}$ en las curvas de SEV profundas llegan a 5000 y 6000 m y las ordenadas a 40 ohm.m.

Por el análisis de las curvas de SEV se comprueba que puede servir de horizonte de apoyo eléctrico fundamental para toda la zona de exploración la capa 4, que tiene por límite superior la superficie derrumbada del paquete de calizas compactas del Carbonífero Superior. Como segundo horizonte de apoyo

puede servir la capa 5 de tipo conductor. Sin embargo la misma no se señala claramente en todas las curvas de SEV y por lo tanto ella no es segura como tal. Sin embargo se realizó también para este horizonte el intento de interpretación de las curvas de SEV.

Para tener una primera idea de la distribución de la superficie del horizonte de apoyo, se confeccionaron algunos planos de isorresistividades aparentes. En la figura 289 se tiene uno de ellos (AB=2000 m), habiendo otros análogos al mismo. En la parte central de la zona del plano se delimita un área de alta resistividad con valores máximos de $\bar{\rho}$ de hasta 400 a 500 ohm.m. Este área en la que se presentan tres subzonas bien delimitadas de resistividad muy alta se extiende en dirección Noreste. Los máximos aislados de $\bar{\rho}$ coinciden con subidas conocidas aisladas de las calizas carboníferas. La parte meridional extensa del área de alta resistividad corresponde a afloramientos de esas calizas. Por consiguiente, el plano de resistividades corresponde, en una primera aproximación, a la estructura de la región examinada al reflejar el horizonte de apoyo de alta resistividad. El análisis del plano hace suponer la importancia de un pliegue de tipo anticlinal con eje de ircección aproximada Noroeste y ala más pendiente al Oeste.

Fig. 289.—Plano de resistividades (según B. L. Gurevich). Región del Don-Medveditsa.
 1.—Punto de SEV;
 2.—Isolíneas de resistividad (Ωm) para separación AB = 2.000 m;
 3.—Tipos de curvas de SEV.



Esta subida del horizonte de apoyo se confirma por los planos de valores de abcisas y ordenadas de $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas de SEV (fig. 290). En el área de la supuesta aproximación del horizonte de apoyo a la superficie del terreno se observa el

máximo valor de $\bar{\rho}_{max}$ (>400 ohm.m) y el mínimo de la abscisa de $\bar{\rho}_{max}$ (<750 m). Este último aumenta en los flancos del plegamiento hasta 2500 m y más. El entorno general del plegamiento y la dirección de su eje se marca de modo casi idéntico en ambos planos.

Fig. 290.—Región Don-Medveditsa. Plano de abcisas y ordenadas $\bar{\rho}_{max}$. (según B. L. Gurevich).
 1.—Punto de SEV;
 2.—Isolíneas de abcisas de $\bar{\rho}_{max}$ (km);
 3.—Isolíneas de ordenadas de $\bar{\rho}_{max}$ (Ω m)



El horizonte eléctrico tomado de apoyo no tiene resistividad infinitamente grande. Sin embargo, suponiendo que su resistividad sea grande, se puede trazar a la rama ascendente de las curvas de SEV una asíntota inclinada 45° con el eje de abcisas y obtener los valores de S. Estos valores se pueden considerar con cierta aproximación iguales a la conductancia longitudinal total del paquete de sedimentos meso-cainozoicos que descansan sobre el horizonte de apoyo. Este método que se aplica con frecuencia en la práctica, no implica grandes errores en la interpretación cualitativa si la resistividad del horizonte de apoyo es suficientemente grande en comparación con la de las capas que lo recubren.

El valor hallado de S oscila, para la región investigada, entre 1 y 15 mho aproximadamente. Por el plano de isovalores de S

(fig. 291) se ve que la conductancia total de las rocas aumenta en los flancos Este y Oeste del supuesto levantamiento. Examinando el corte geoelectrico, es fácil concluir que en la variación del valor de S debe influir principalmente la variación de los parámetros de la capa 3.

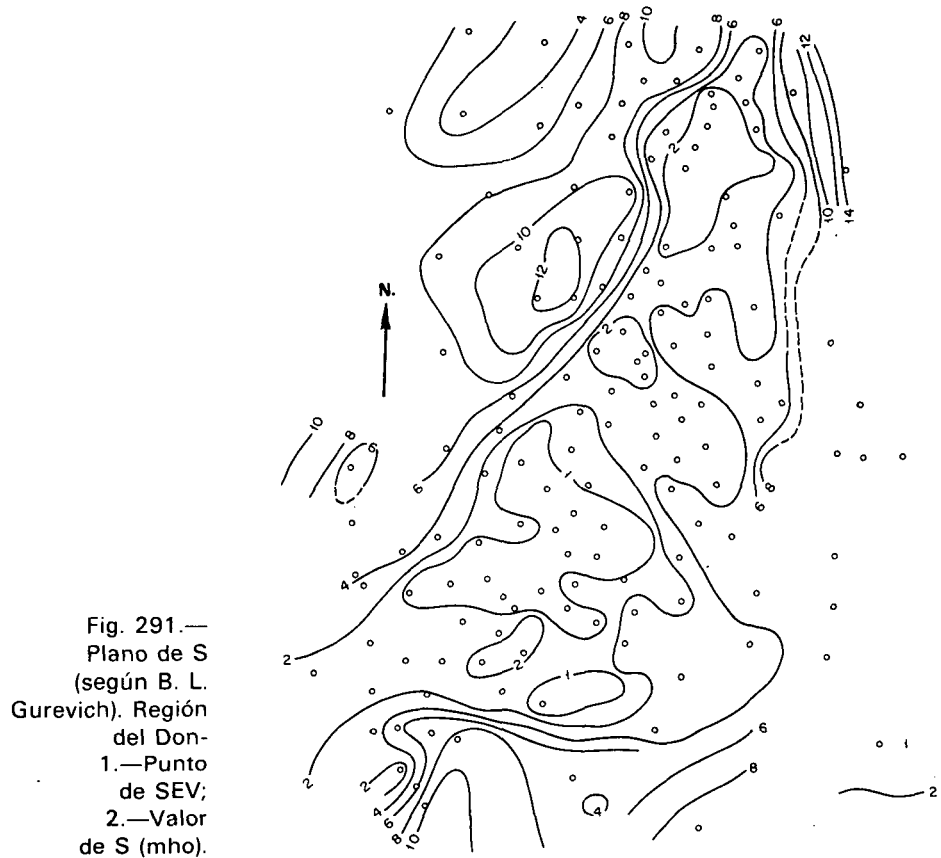


Fig. 291.—
Plano de S
(según B. L.
Gurevich). Región
del Don-
1.—Punto
de SEV;
2.—Valor
de S (mho).

El valor de $\bar{\rho}_{min}$ en el que también la principal influencia es debida a la capa 3, varía entre límites pequeños, de 20 a 50 ohm.m. Esto permite suponer que la resistividad de la capa 3 y por consiguiente también la resistividad media longitudinal de todo el paquete de rocas que yace sobre el horizonte de apoyo, varía escasamente en comparación con la variación de S y que el aumento de S se condiciona en líneas generales para el aumento de espesor de las rocas sedimentarias. Se puede suponer por tanto que el plano S refleja el hundimiento del horizonte de apoyo de alta resistividad en la parte central de la zona en dirección Oeste y Norte.

Para pasar a la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV es necesario estimar las resistividades paramétricas iniciales de las capas.

Los parámetros de la capa 1 (h_1, ρ_1) se calculan en las curvas de SEV con ayuda de los ábacos de dos y tres capas. No teniendo en este caso plano de estos parámetros, indicaremos que el valor h_1 en la zona de exploración varía entre 5 y 30 m y ρ_1 entre 10 y 50 ohm.m.

La resistividad de la capa 2 cuyo espesor, igual que el de la primera capa, es pequeño en comparación con la totalidad del paquete de capas que yace sobre el horizonte de apoyo, se calcula por la parte izquierda de las curvas de SEV directamente mediante su interpretación con ayuda de los ábacos de tres capas. Según la indicación de estos ábacos, la resistividad de la capa 2 oscila bastante, principalmente entre 50 y 300 ohm.m; en cuanto al espesor varía entre 5 y 50 m, llegando en casos aislados a 100-150 m.

Para el cálculo de la resistividad de la capa 3, que descansa directamente sobre el horizonte de apoyo, se analizó el material de SEV de la zona de exploración. El examen de los planos de abcisas y ordenadas de los puntos extremales de las curvas de SEV lleva a la conclusión de que en la mayoría de los casos el valor de la resistividad ρ_3 puede tomarse como constante e igual a 30 ohm.m. Esto es atestiguado de modo convincente por la forma de gran número de curvas análogas a las gráficas de SEV 27 y SEV 111 (fig. 292). Sin embargo, en la zona investigada se encuentran curvas en las que la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ es considerablemente menor de 30 ohm.m (fig. 292, SEV 147) o recíprocamente, la expresión de $\bar{\rho}_{min}$ y magnitud de su ordenada indican que ρ_3 evidentemente es mayor de 30 ohm.m (fig. 292, SEV 99). En tales casos, la magnitud de este parámetro se fijó por el aspecto del mínimo de la curva de SEV. Así por ejemplo para la curva de SEV 147 se admitió $\rho_3 = 15$ ohm.m, para la curva de SEV 99 y otras análogas $\rho_3 = 40$ ohm.m.

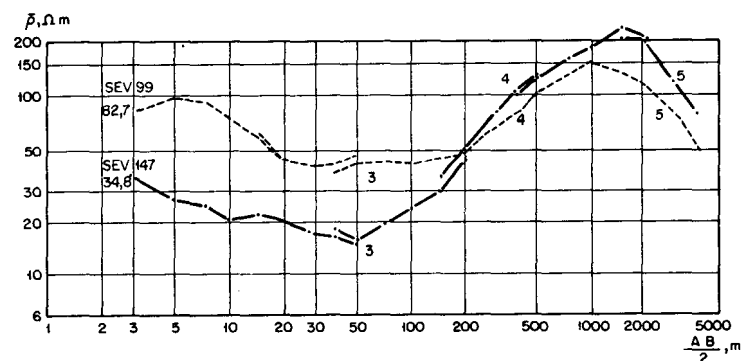
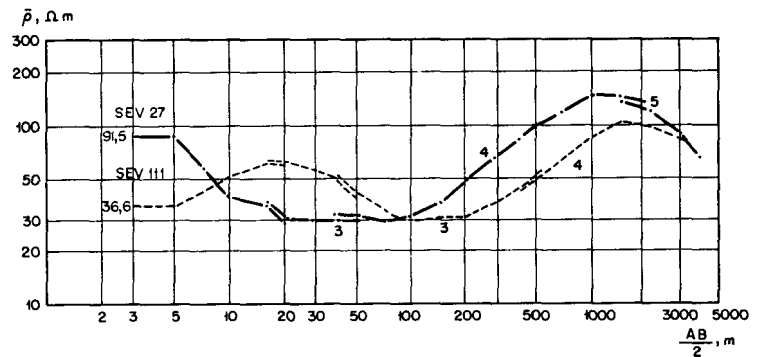


Fig. 292.—
Curvas de SEV
que caracterizan
a la resistividad
paramétrica de la
capa 3. Región
Don-
Medveditsa.

El espesor de la capa 3, h_3 , hallado por los resultados de la interpretación de SEV, oscila entre 20 y 100 m en las áreas en que el yacente sube y entre 200 y 300 m en las que baja.

La profundidad hasta la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad ($H=h_1+h_2+h_3$) varía según los resultados de la interpretación de 10 a 15 m, hasta 400 a 500 m, habiendo puntos en que dicho horizonte de apoyo es aflorante.

Para calcular el espesor de la capa 4 y por tanto la profundidad de la superficie del horizonte conductor 5, es necesario disponer del valor del parámetro ρ_4 . Las medidas en los afloramientos de la capa 4, como hemos visto, indican un valor máximo $\rho_4=1000$ ohm.m. Para la interpretación de las curvas de SEV se tomó como parámetro inicial $\rho_4=1170$ ohm.m, para mayor comodidad de su tratamiento en los ábacos de tres capas con módulo $\mu_1=39$ para valor del parámetro $\rho_3=30$ ohm.m. El parámetro ρ_4 se tomó constante para toda la superficie explorada, lo que también se considera condicionalmente admisible. La resistividad del horizonte de apoyo conductor (capa 5) se tomó como infinitamente pequeña ($\rho_5=0$) a efectos prácticos. Con estas condiciones, el espesor h_4 de la capa 4, según los resultados de la interpretación de las curvas de SEV varía de 150 hasta 500 a 600 m.

Veamos un ejemplo de interpretación cuantitativa de curvas de SEV de tipo KHK (SEV 75, en fig. 288) el más extendido en la zona de exploración. Tales curvas se interpretan por los métodos conocidos sin dificultad especial. La parte izquierda de la curva de SEV en el caso considerado coincide bastante bien con la curva de tres capas de módulo $\nu_1=1,5$ del ábaco 59 ($\mu_1=4$ $\mu_2=1$). Esto da la posibilidad de calcular $h_1=7$ m, $\rho_1=34$ ohm.m, $h_2=10,5$ m, $\rho_2=135$ ohm.m; $x_K=26$ m; $y_K=75$ ohm.m.

Tomando la resistividad de la capa 3 igual a 30 ohm.m, tendremos

$$\mu_K = \rho_3 / y_K = 1/2,5.$$

Utilizando para la interpretación de la parte central de la curva de SEV el ábaco 82 ($\mu_1=3/7=1/2,3$; $\mu_2=\infty$) hallamos $\nu_K=12$ o, después del cálculo correspondiente, conforme al principio de equivalencia, $\nu_K=12 \cdot 2,3/2,5=11$. De aquí $h_3=x_K \cdot \nu_K=286$ m. Para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV calcularemos las coordenadas del punto H:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_3 = 304 \text{ m};$$

$$y_H = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{S_1 + S_2 + S_3} = 304/9,8 = 31 \text{ ohm.}; \rho_4/y_H = 1170/31 = 38.$$

En el ábaco 92 ($\mu_1=39$; $\mu_2=0$) corresponde $\nu_H=0,7$ ó después del cálculo según el principio de equivalencia

$$\nu_H = 0,7 \cdot 39/38 = 0,72.$$

Esto lleva a $h_4 = x_H \cdot \nu_H = 205$ m.

Por consiguiente, el resultado de la interpretación de la curva de SEV 75 es el siguiente:

$$\begin{array}{ll}
 h_1 = 7 \text{ m}, & \rho_1 = 35 \text{ ohm.m.} \\
 h_2 = 10,5 \text{ m}, & \rho_2 = 135 \text{ ohm.m.} \\
 h_3 = 286 \text{ m}, & \rho_3 = 30 \text{ ohm.m.} \\
 h_4 = 205 \text{ m}, & \rho_4 = 1170 \text{ ohm.m.} \\
 h_5 = \infty, & \rho_5 = 0.
 \end{array}$$

Redondeando, hallamos que la profundidad hasta la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad (capa 4) es de 300 m. y hasta el horizonte conductor (capa 5), 500 m.

El grado del error de interpretación es difícil de calcular en la zona investigada ya que al tomar valores condicionales de las resistividades paramétricas de las capas 3 y 4, de las que depende principalmente el resultado de la interpretación, desconocemos de qué orden es su proximidad respecto a los verdaderos valores ni el grado de constancia de los mismos en la zona investigada. Teniendo en cuenta la posibilidad de anisotropía de las rocas y la circunstancia de que para la interpretación de las partes media y derecha de la curva de SEV se ha supuesto $\rho_4 = \infty$ $\rho_5 = 0$, es probable que la profundidad del horizonte de apoyo hallada sea algo exagerada respecto a la verdadera, incluso en el supuesto de que los valores ρ_3 y ρ_4 estuvieran calculados con exactitud suficiente.

Resultados poco exactos pueden obtenerse por el contrario en la interpretación de las curvas análogas a las gráficas de SEV 87 (fig. 288). Como ya se ha indicado, tales curvas se presentan en zonas en que existen arenas secas. La alta resistividad de las mismas provocan el efecto pantalla sobre las capas 1 y 2 infrayacentes quedando señaladas las mismas de modo confuso en las curvas de SEV. Prescindiendo para la interpretación de la rama izquierda se considera como horizonte eléctrico superficial el conjunto de las capas 1 y 2 y de las arenas que las recubren. La resistividad de este horizonte se calcula por el curso de la parte estable de la rama descendente que forma también el mínimo. Para la curva de SEV 87 se calcula con ayuda del ábaco de dos capas el espesor del horizonte superior de resistividad muy alta: $h_0 = 4$ m; prescindiendo entonces de la rama izquierda y sabiendo que $\rho_3 = 30$ ohm.m, con ayuda del ábaco de tres capas 84 ($\mu_1 = 1/9$ $\mu_2 = \infty$), hallamos $h_{0+1+2} = 60$ m, $\rho_{0+1+2} = 270$ ohm.m; $\nu_1 = 1/2,5$. De aquí $h_3 = 25$ m y las coordenadas del punto H:

$$\begin{array}{ll}
 x_H = 85 \text{ m}; & y_H = 90 \text{ ohm.m.}
 \end{array}$$

Suponiendo como siempre que $\rho_4 = 1170$ ohm.m, hallamos $\mu_H = \rho_4 / y_H = 13$.

Tomamos para la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV el ábaco 91 ($\mu_1 = 19$; $\mu_2 = 0$). Hallamos aproximadamente $\nu_H \approx 2$. Haciendo el cálculo conforme al principio de equivalencia tendremos $\nu_H = 2 \cdot 19 / 13 = 2,9$ y por consiguiente, $h_4 = x_H \cdot \nu_H = 245$ m. La profundidad del primer

horizonte de apoyo (de alta resistividad) es por tanto de 85 m y la del segundo (conductor) de unos 300 m. En este punto de SEV el espesor del horizonte de resistividad elevada (capa 4) es del mismo orden que en el punto de SEV 75, mientras que el espesor de la capa 3 disminuye bastante.

El resultado de la interpretación cuantitativa de tales curvas de SEV se debe considerar como muy aproximado. Sin embargo la comparación cualitativa de las mismas con las gráficas de SEV de aspecto normal lleva a unas conclusiones exactas de la marcha relativa de la superficie del horizonte de apoyo. Comparadas entre sí por ejemplo, las curvas de SEV 75 y de SEV 87 se ve claramente que disminuye la profundidad de ambos horizontes en el punto de SEV 87.

Para la curva de SEV 154 (fig. 288) situada en la zona Norte de valores máximos de la resistividad aparente, se puede estimar la profundidad de la superficie del Carbonífero en unos 10 m. Para ella la resistividad de los sedimentos superficiales es de 80 a 90 ohm.m, es decir igual al valor de la resistividad media de las capas obtenido por nosotros, que descansan sobre el horizonte de apoyo de alta resistividad en el punto de SEV 87. El horizonte de apoyo poco profundo en el punto de SEV 154, como ya se ha indicado, permite apreciar lo heterogéneo de su estructura. En el conjunto estratigráfico del horizonte de apoyo, según parece, existe una capa de relativamente baja resistividad cuya magnitud no se puede calcular. Si se toma en el punto de SEV 154, según lo anterior, el valor de la capa 4 igual a 1170 ohm.m, entonces haciendo uso del ábaco de curvas de tres capas construido gráficamente para $\mu_1 = 15$ y $\mu_2 = 0$ hallamos mediante extrapolación $\nu_1 \approx 65$ y por consiguiente $h_4 = 650$ m. Por consiguiente, la profundidad del horizonte de apoyo conductor sería aquí de 660 m aproximadamente. Pero este resultado no es confiable ya que la curva de SEV 154 coincide mal con la curva del ábaco. El valor obtenido de la profundidad del horizonte de apoyo aparentemente es muy exagerado.

El SEV 154 alcanza la separación $AB = 20$ km. La rama final de la curva de SEV está inclinada un ángulo de 45° respecto al eje de abscisas ($S = 180$ mho) y señala evidentemente el basamento cristalino (*).

Para las curvas análogas a la gráfica del SEV 4 (fig. 288) que señalan el horizonte de apoyo de alta resistividad a poca profundidad debajo de sedimentos conductores jurásicos que afloran en la superficie del terreno, sólo se puede calcular con seguridad suficiente la profundidad de este horizonte. El cálculo de su espesor y por consiguiente la profundidad del horizonte de apoyo conductor (capa 5) para tales curvas es difícil.

(*) Repetidos sondeos profundos, realizados en la zona del SEV 154 con ayuda de una estación eléctrica en el año 1953 ($AB = 30$ km) señalaron que existieron mediciones erróneas aquí en el año 1938 para grandes separaciones. Según la curva de SEV obtenida en el año 1983, $S = 360$ mho, cuyo valor es muy próximo al obtenido en la perforación mecánica próxima para la conductancia longitudinal total del conjunto de los sedimentos que descansan sobre el basamento.

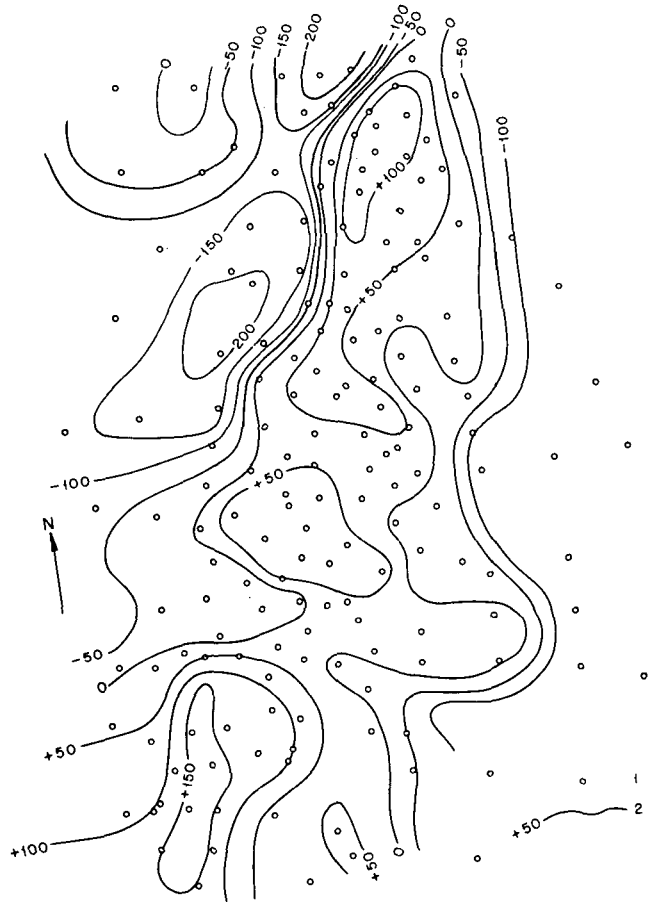
Comparando la parte izquierda de la curva de SEV 4 con el ábaco de dos capas llegamos a la conclusión de que para $\rho_1 = 7$ ohm.m, $h_1 = 30$ m, la resistividad de la parte superior del horizonte de apoyo no rebasa de 30 ohm.m (probablemente calizas ruiformes agrietadas). Suponiendo que existen más abajo rocas más compactas ($\rho_4 = 1170$ ohm.m) y utilizando el ábaco 95 ($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = \infty$) hallamos como valor del espesor de la parte superior del horizonte de apoyo la magnitud 240m ($\nu_1 = 8$). Según esto la superficie de la roca compacta del Carbonífero se encuentra aquí a unos 270 m de profundidad.

Veamos a qué conduce la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV. Suponiendo $\mu_1 = 4$, $\nu_1 = 9$ hallamos la posición del punto A. En la interpretación de la parte derecha de la curva de SEV con ayuda del ábaco 92 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 0$) debe trasladarse el punto A un poco a la izquierda para conseguir la coincidencia óptima de la curva de SEV con la curva ($\nu_1 = 3$) del ábaco. El punto A corregido tiene como coordenadas $x_A = 230$ m, $y_A = 22$ ohm.m. De aquí que $\rho_4 / y_A = 1170 / 22 = 53$. Calculando el valor de ν_1 por el principio de equivalencia tendremos $\nu_A = 3.39 / 53 = 2,2$. Esto nos da el espesor de la capa $h_A = x_A \cdot \nu_A = 500$ m. El valor corregido del espesor de la capa segunda después del desplazamiento del punto A es $h_2 = 180$ m. Por consiguiente la profundidad de la superficie del horizonte de apoyo conductor podría valorarse de modo aproximado aquí en 700 m. No es posible calcular un resultado seguro debido al mismo carácter de la curva de SEV que tiene una rama ascendente amplia así como un máximo y bajada final de la gráfica mal definidos.

Tales son los ejemplos de interpretación de curvas de SEV en la región considerada. El resultado de la interpretación cuantitativa de todo el material de SEV señaló que la variación más normal de la cota de la superficie fue observada para el horizonte de apoyo de alta resistividad. Las cotas de la superficie del horizonte de apoyo conductor presentaban grandes variaciones. Por consiguiente, se decidió limitarse a la confección del plano de la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad exclusivamente. Este plano se ha reproducido en la figura 293. En el mismo se aprecia una zona de levantamiento del horizonte de apoyo alargada en dirección NE-SO y contorneada casi enteramente por la isolínea de 0 m. En dicha zona se definen tres áreas de cota máxima de la superficie del horizonte investigado con valores que van de +50 a +150 m. El flanco Noroeste tiene una pendiente más fuerte que el Sureste. En la parte Noroeste se manifiesta el hundimiento del horizonte de apoyo hasta la cota -200 m. Esta parte separa la parte alta principal de la zona de otra que existe en el extremo Noroeste de la región investigada.

Como se aprecia, los planos de interpretación cualitativa coinciden bastante bien con la interpretación cuantitativa de la estructura de la región. Las perforaciones realizadas posteriormente confirmaron las conclusiones esenciales de la exploración eléctrica.

Fig. 293.—
Plano del relieve
de la superficie
del horizonte
eléctrico de apoyo
de alta
resistividad
(según B. L.
Gurevich) Región
Don-
Medveditsa.
1.—Punto
de SEV;
2.—Isohipsa
(m) de la
superficie del
horizonte de alta
resistividad
(calizas del
Carbonífero).



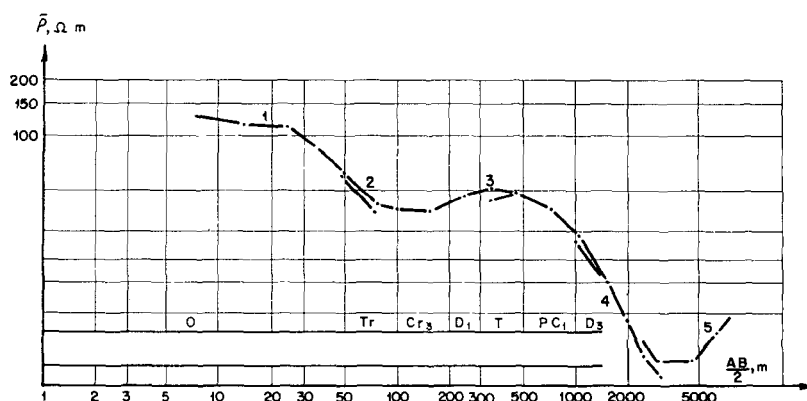
Parte Noroeste de la fosa del Dnieper-Donets (RSS de Bielorrusia)

Analizaremos el resultado de los trabajos de exploración eléctrica realizados en el año 1954 en Bielorrusia, prolongación noroccidental de la fosa del Dnieper-Donets. Se realizaron SEV con separaciones AB de hasta 16 a 20 km, haciendo uso de estaciones de exploración eléctrica para el estudio del relieve de la superficie de sales minerales del Devónico Superior, para búsqueda de estructuras paleozoicas favorables a la acumulación de petróleo y gas. El horizonte eléctrico de apoyo, de resistividad prácticamente infinita, está bastante profundo (hasta 1000 y 2000 m y más). Sobre el complejo sedimentario salino existen materiales cuaternarios, paleógenos, cretácicos, jurásicos, triásicos, pérmicos, carboníferos y parte de los del Devónico Superior.

El corte geoelectrónico de la zona se caracteriza en casi todas las curvas de SEV por cinco capas y corresponde al tipo HKH (fig. 294). En función del análisis conjunto de los resultados de sondeos mecánicos, testificación de los mismos y curvas paramétricas de SEV, se obtuvieron las siguientes relaciones entre los horizontes eléctricos y estratigráficos del corte.

Capa 1, pertenece a sedimentos de edad cuaternaria (arenas cuarcíferas, gravas, arcillas). Su resistividad varía de 60-100 ohm.m a 5000-6000 ohm.m y más. Espesor de la capa, 10 a 20 m.

Fig. 294.—
Ejemplo de curva
típica de SEV.
Parte norte de la
fosa Dnieper-
Donets.



Capa 2, se señala en la rama descendente de la parte izquierda de las curvas de SEV; pertenece a sedimentos superiores del Paleógeno (arcillas, arenas con arcillas interestratificadas). Los valores de la ordenada de $\bar{\rho}_{min}$ varían entre 30 y 40 ohm.m, aumentando para valores muy altos de ρ_1 hasta 60 a 80 ohm.m. La abscisa de $\bar{\rho}_{min}$ no excede de 100 a 250 m. El espesor total de estas capas 1 y 2 no excede, según los datos de perforación e interpretación de SEV, de 70 a 100 m.

La resistividad de la capa 2 por los resultados de la interpretación de los SEV paramétricos oscila entre 10 y 25 ohm.m.

Capa 3, formada aparentemente por paquetes arenosos paleógenos, sedimentos del Cretácico Superior (creta blanca, margas) y Jurásico Superior (areniscas, arenas, arcillas, calizas); tiene resistividad elevada. El espesor de la capa 3 es de 300 a 400 m. La interpretación de las curvas de SEV paramétricas de valores ρ_3 da 80 a 100 ohm.m.

Capa 4, está relacionada con sedimentos arenisco-arcillosos, triásicos, pérmicos, carboníferos y devónicos de tipo terrígeno. Por las diagráfias, la capa 4 se caracteriza por ser la de mínima resistividad entre todos los sedimentos del paquete superior al salino. Su valor disminuye en la base del paquete, variando de 6-5 a 2,5-0,5 ohm.m, lo que se supo debido al aumento gradual de la mineralización de las capas de las aguas subterráneas con la profundidad.

En las curvas de SEV la capa 4 se refleja claramente por una bajada. El valor de $\bar{\rho}_{min}$ varía en la zona investigada entre 1,7 y 13 ohm.m. En la misma se observa un aumento del valor de $\bar{\rho}_{min}$ de Este a Oeste. El análisis de las curvas de SEV indica que en esta misma dirección se presenta la subida de la superficie del horizonte eléctrico de apoyo. Por consiguiente, el valor de $\bar{\rho}_{min}$ depende de la profundidad del horizonte de apoyo. Esto también lo pone de manifiesto la comparación de las curvas de SEV con los resultados de los sondeos mecánicos, realizados solamente en la parte Este de la zona: Areas de hundimiento del horizonte de apoyo se corresponden con valores pequeños de $\bar{\rho}_{min}$; las subidas del horizonte de apoyo invariablemente arrastran tras sí el aumento de $\bar{\rho}_{min}$.

La variación de $\bar{\rho}_{min}$ está estrechamente relacionada con la del parámetro ρ_4 que, como señalan los resultados de la testificación de los pozos, disminuye al aumentar la profundidad del horizonte de apoyo.

El examen de las curvas de SEV para toda la zona, en comparación con los resultados de la perforación y testificación de pozos, pone por tanto en evidencia que el parámetro ρ_4 no permanece constante. Su valor aumenta en dirección Este-Oeste.

El espesor de la capa 4 varía entre límites amplios. En los pozos de la parte Este de la zona varía entre 600 y 1.500 m y más. La capa 4 juega un papel de gran importancia en el corte estudiado.

Capa 5, de resistividad infinitamente grande. Sirve como horizonte de apoyo eléctrico. Presenta sal de roca del Devónico Superior. Las curvas de SEV se caracterizan por la rama derecha asintótica que forma con el eje de abscisas un ángulo de 45°. El valor S varía para la zona estudiada entre 200 y 2.000 mho y más, aumentando de Oeste a Este.

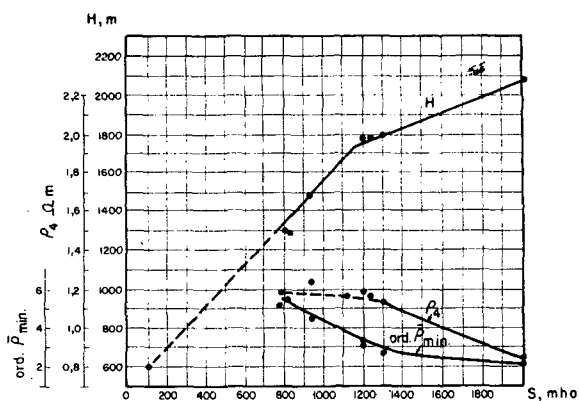
Los planos de interpretación cualitativa de las curvas de SEV dan una idea general clara de la estructura de la región. Por el análisis de estos planos se llega a la conclusión de que la resistividad de la capa 3 es suficientemente constante. Se comprobó que el valor ρ_3 según la posición del punto $\bar{\rho}_{max}$ de las curvas era igual en casi toda la zona estudiada al hallado por la interpretación de los SEV paramétricos (principalmente de 80 a 120 ohm.m). El valor inicial de ρ_2 según los planos de interpretación cualitativa no sufre dentro de los límites de la zona grandes variaciones; el curso de la parte izquierda de las curvas de SEV demuestra que el parámetro ρ_2 se puede admitir que varíe entre 20 y 30 ohm.m. Es fácil comprobar que a causa del relativamente pequeño espesor de la capa 3 y especialmente de la capa 2 el error posible en el cálculo de sus resistividades no introduce un error de consideración en la valoración del espesor del conjunto de los sedimentos que descansan sobre el paquete de rocas salinas.

Comparando los planos de S y de valores $\bar{\rho}_{min}$ y con los resultados de la interpretación de los SEV paramétricos contiguos a los sondeos mecánicos y a los puntos de investigación sísmica, se pudo establecer una relación directa entre las indicaciones de las curvas de SEV, la profundidad del horizonte de apoyo y la resistividad paramétrica ρ_4 .

En la figura 295 se presentan unas gráficas que caracterizan las relaciones entre los valores H, S, ρ_4 y $\bar{\rho}_{min}$ según los resultados de la interpretación de las curvas de SEV próximas a los sondeos mecánicos y puntos de exploración sísmica por el método de refracción. Estas gráficas se refieren a la parte Este de la zona, la única en que se efectuaron perforaciones y sondeos sísmicos de refracción. Para las curvas de SEV paramétricas, el valor S varía entre 800 y 2000 mho. Como se ve la dependencia entre S y H, al variar S entre 800 y 1200 mho se expresa prácticamente por una línea recta. Esta

recta se ha prolongado (de puntos) también para la parte de valores de S menores, observados en la parte Oeste de la zona investigada. Por consiguiente, se supone que en esta parte de la región existe también una dependencia lineal entre los valores de H y de S.

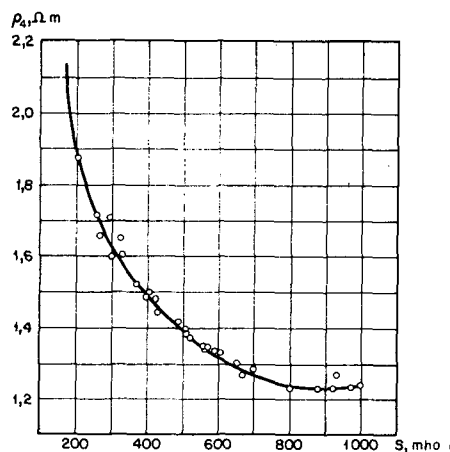
Fig. 295.—
Relación entre las variaciones de H, S, ρ_4 y ordenada de $\tilde{\rho}_{min}$ según los datos de perforación, exploración sísmica y SEV paramétricos (según A. D. Mishin y D. V. Mishin). Zona de exploración en BSSR.



Utilizando el gráfico es fácil calcular el parámetro ρ_4 para la interpretación de las curvas de SEV en la parte Este de la zona investigada para cualquier valor de S desde 800 hasta 200 mho, obtenido de la curva de SEV. El valor de ese parámetro varía en este caso, como se ve en la gráfica, entre 1,23 y 0,9 ohm.m.

Para valorar los parámetros en los puntos de SEV de la parte Oeste de la zona, en la que no se efectuaron ni pozos ni sondeos sísmicos de refracción, los investigadores procedieron del modo siguiente. Por la relación gráfica entre S y H (fig. 295), se calculó un valor supuesto de H en cada punto de SEV. Mediante la interpretación de las curvas de SEV, admitido conocida la profundidad del horizonte de apoyo en cada punto de SEV, se evaluó el parámetro ρ_4 . A continuación se dedujo la dependencia gráfica entre ρ_4 y S para todas las curvas de SEV que había que interpretar en la parte Oeste de la región (el valor S varía en ella entre 200 y 1000 mho). Se comprobó que los puntos correspondientes a los valores hallados de ρ_4 se alinean también de un modo normal (fig. 296).

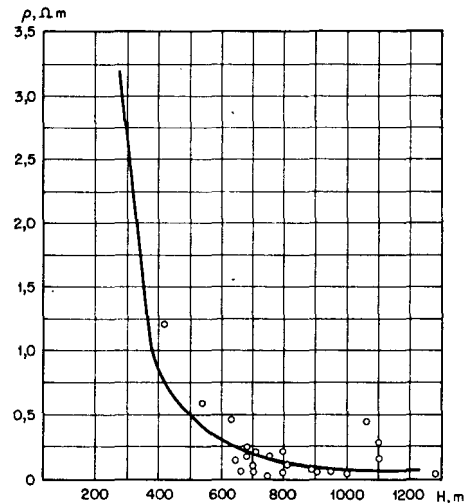
Fig. 296.—
Relación entre S y ρ_4 según los resultados de la interpretación de las curvas de SEV (según A. D. Mishin y D. V. Mishin). Parte Sur de la región investigada en Bielorrusia.



La gráfica indica que el parámetro ρ_4 varía en la parte Oeste de la región de 1,2 ohm.m, en las áreas de horizontes de apoyo profundo principalmente (S entre 800 y 1000 mho) a 2,1 ohm.m en las que la superficie del mismo es relativamente superficial (S = 175 mho). La ley de la disminución de ρ_4 con el aumento de S (es decir con la profundidad del horizonte de apoyo) como vemos es irregular. Para un aumento de S desde 175 a 250 mho, ρ_4 baja fuertemente a continuación al aumentar S hasta 800 mho la bajada disminuye y para valores grandes de S (hasta 1000 mho) queda casi invariable. Es interesante señalar que esa ley de variación del parámetro ρ_4 concuerda bien con la gráfica de variación de resistividad de las aguas intersticiales con la profundidad según los resultados de la interpretación de los datos de la investigación de geofísica de producción de los pozos profundos en Bielorrusia (fig. 297).

La interpretación cuantitativa de las curvas de SEV de la zona para valores conocidos de las resistividades paramétricas de las capas no presenta dificultad: Las curvas de SEV son en este caso normalmente claras. La interpretación se realiza por el método habitual que ya conocemos mediante la aplicación

Fig. 297.—
Variación de la resistividad del agua intersticial con la profundidad según los resultados de la interpretación de la investigación de geofísica de producción en un sondeo profundo realizado en el año 1954 en Bielorrusia (según B. S. Temkin).



de los ábacos de tres capas y auxiliares. En la figura 298 se tiene un plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte de apoyo según los resultados de la interpretación cuantitativa. La estructura de la zona explorada por la superficie de los sedimentos salíferos del Devónico Superior reflejada por este plano es, como vemos, bastante compleja. La superficie del horizonte de apoyo se hunde del Oeste al Este, variando también al mismo tiempo la intensidad del hundimiento. Este hundimiento se diversifica en una serie de zonas de levantamiento y fuerte descenso de la superficie del horizonte de apoyo. Estas áreas tienen, según los resultados de SEV, formas, extensiones, pendientes de sus flancos y medidas distintas.

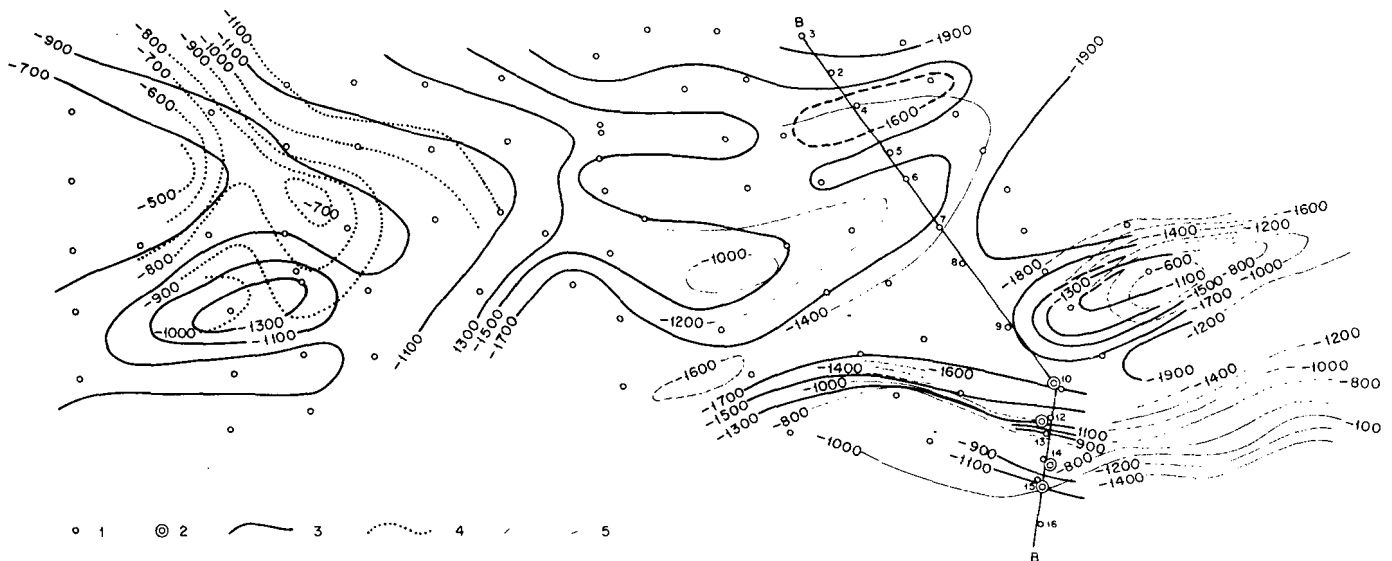


Fig. 298.—Plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande (según D. V. Mishin y A. D. Mishin). Zona de exploración en BSSR, año 1954.

- 1.—Puntos de SEV y números correspondientes (en la línea BB);
- 2.—Pozos;
- 3.—Isohipsas de la superficie del horizonte eléctrico de apoyo (sedimentos salinos del Devónico superior);
- 4.—Isohipsas de la superficie del horizonte de sedimentos infrasalinos (?) que aparece eventualmente;
- 5.—Isohipsas de la superficie de un horizonte que se interpreta (sedimentos salinos del Devónico superior).

En esta misma figura 298 se tiene el esquema estructural de la región según los resultados de la investigación sísmica por el método de reflexión (en la parte Oeste) y por el de refracción (en la parte Este). La estructura de los sedimentos superiores a los salíferos según el método de reflexión se asemeja en líneas generales a la estructura de la superficie de los sedimentos salinos según los resultados de los SEV. También se observa una buena correspondencia entre los resultados de la sísmica de refracción y de los SEV en la parte Este de la zona explorada aunque las cotas indicadas por uno y otro método son distintas.

En la figura 299 se tiene un corte geoelectrico de la parte Este de la zona investigada por la línea BB (fig. 298). En el extremo Sur de esta línea (SEV 15, 14, 13, 12, 10) de la zona explorada, en el que la superficie de la capa salífera se levanta fuertemente, ello se señala bien en las curvas de SEV, aunque hay algunas desviaciones (SEV 13 en la fig. 299) a causa del ángulo escarpado de inclinación de dicha superficie y posiblemente por la disposición alterada de sus estratos. En el corte se diferencian claramente también dos áreas de horizonte de apoyo elevado en la parte Este de la línea del corte. Las curvas de SEV de la figura 300 correspondientes a algunos puntos del perfil BB ponen de manifiesto con cuanta claridad, desde el punto de vista cualitativo, caracterizan los mismos la variación de la profundidad de la superficie del horizonte estudiado. En la tabla 58 se tiene, a modo de ejemplo, el resultado de la interpretación cuantitativa de las curvas indicadas de SEV (por A. D. Mishin y D. V. Mishin).

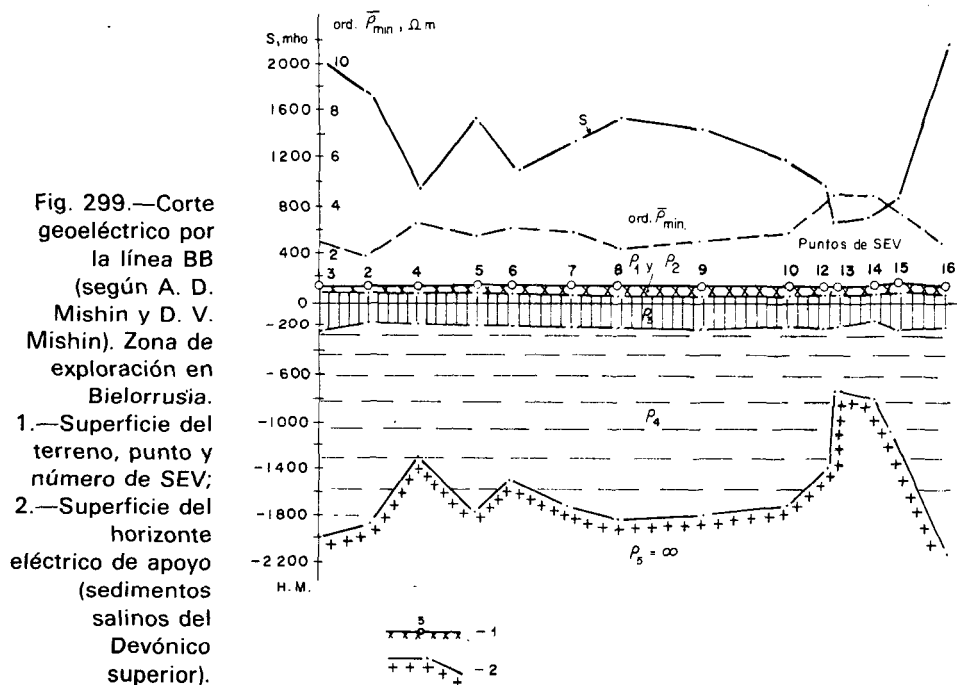
La investigación por el método eléctrico en la zona considerada pone de manifiesto que en este caso es perfectamente aplicable a pesar de la presencia de fuertes escarpes en el relieve del horizonte de apoyo. La idoneidad de la zona para la exploración eléctrica se comprende por la división clara del corte eléctrico, la constancia relativa de las resistividades de las capas 2 y 3 y la variación

suficientemente regular del parámetro ρ_a , así como la estabilidad del horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande.

TABLA 58

RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE LAS CURVAS DE SEV A LO LARGO DEL PERFIL
(POR A. D. MISHIN Y D. V. MISHIN). ZONA DE EXPLORACION EN BIELORRUSIA

N.º de SEV	S (mho)	ρ_2 (ohmm)	$h_1 + h_2$ (m)	ρ_3 (ohm.m)	h_3 (m)	$h_1 + h_2 + h_3$ (m)	ρ_4 (ohmm)	h_4 (m)	H (m)	Altitud (m)	Cota (m)	Abacos
3	1.850	26	65	104	315	380	0,96	1.770	2.150	150	-2.000	89;86
4	900	22	50	90	265	315	1,23	1.120	1.435	135	-1.300	89;86
9	1.400	24	60	96	300	360	1,13	1.570	1.930	130	-1.800	89;86
13	620	9	50	83	270	320	0,92	560	880	140	-740	90;86
(junto a pozo) 16	2.150	25	60	100	300	360	0,9	1.930	2.300	100	-2.200	89;86



Cuenca de Minusink

Examinaremos un ejemplo de interpretación de curvas de SEV para el caso de investigación de la región de la parte Norte de la cuenca de Minusink, que constituye una zona de tipo complejo para este tipo de investigaciones. La exploración eléctrica fue realizada en el año 1952 con objeto de estudiar la tectónica de los sedimentos del Hullero y Devónico.

Hasta el comienzo de los trabajos de exploración eléctrica, se realizaron en la región levantamientos geológicos y se perforaron sondeos someros cuyos resultados se reflejaron en una carta geológica. No se realizaron sondeos mecánicos

profundos en la región. Se obtuvo una idea del corte geológico general de la misma y de sus características eléctricas mediante los datos de perforación y testificaciones de la misma en las regiones colindantes con estructura geológica análoga a la que se estudiaba.

En la región explorada se presentan sedimentos devónicos, carboníferos, jurásicos y cuaternarios. El orden de deposición (de arriba a abajo) y las características litológicas de las rocas del corte general puede expresarse del modo esquemático siguiente.

Los sedimentos de edad cuaternaria son tierras arcillosas de aspecto de loess, gredas arenosas, arenas y arcillas. Espesor hasta 70 m.

Jurásico, compuesto de areniscas, limolitas, argilitas y conglomerados con areniscas intercaladas. Se subdivide en los siguientes paquetes: c arenoso; b carbonífero; a conglomerático. Espesor de 0 a 700 m.

Carbonífero Inferior, presenta limolitas, argilitas, areniscas y calizas. Espesor hasta 400 m.

Piso Famenski	Devónico Superior Tramo Bystrianski (hasta 100 m) Tramo Tubinski (unos 800 m)	Areniscas y interestratificadas; tratificadas.
Piso Franski	Tramo Kokaiski (unos 300 m) Tramo Monokski (unos 500 m)	
Piso Zhivetski	Devónico Medio Tramos Beiski + Ile- morovki + Askizki (unos 400 m) Tramo Abakanski (unos 400 m)	Calizas, arenis- cas y limolitas interestratificadas; debajo rocas efusivas.

Datos de resistividades de las rocas de edad jurásica y carbonífera no existen. Las características eléctricas aproximadas de los sedimentos devónicos según los resultados de testificación de pozos de regiones colindantes son (fig. 301):

Tramo Bystrianski	unos 450 ohm.m
Tramo Tubinski	de 17 a 70 ohm.m
Tramo Kojaiski	de 25 a 60 ohm.m
Tramo Monokski	de 50 a 180 ohm.m
Tramo Beiski	de 400 a 600 ohm.m
Tramo Ilemorovski y Askizski	unos 130 ohm.m
Tramo Abakanski	unos 200 ohm.m

Las resistividades de las diferentes series varía, como veremos, entre grandes límites. Sin embargo el corte

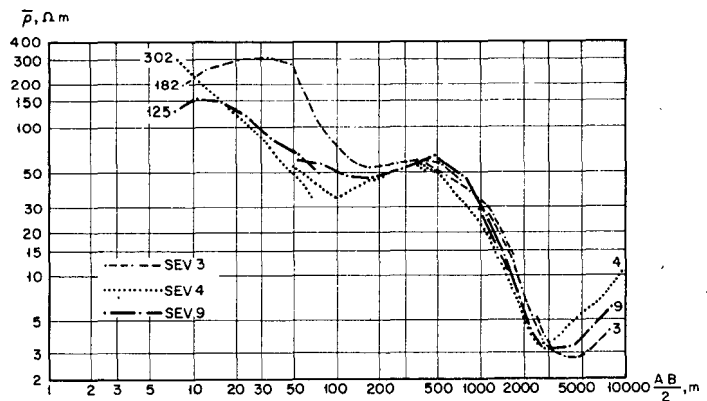
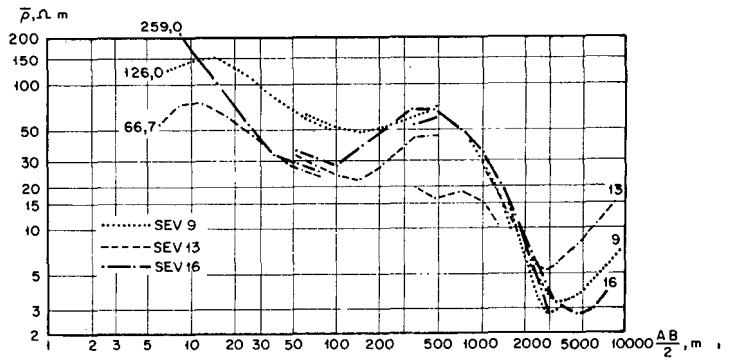


Fig. 300.—Curvas de SEV en la línea del perfil BB (por A. D. Mishin y D. B. Mishin). Zona de exploración en BSSR.

geoelectrico típico de la región se puede traducir en el siguiente de cinco capas (fig. 301).

Capa 1. Sedimentos cuaternarios; su resistividad, según los datos de la interpretación de las curvas de SEV, oscila entre 15 y 170 ohm.m, su espesor entre 10 y 60 m.

Capa 2. Conductora; corresponde a sedimentos de edad jurásica. En algunas áreas de la zona el paquete de sedimentos jurásicos se refleja en las curvas de SEV como dos capas de resistividad distinta. En este caso a la capa menos conductora la designamos por 2'. La resistividad de los sedimentos jurásicos, juzgando por el aspecto de las curvas de SEV, es de 15 a 30 ohm. m.

Capa 3. De resistividad elevada; se debe suponer que corresponde a sedimentos del Carbonífero y tramo Bystrianski del Devónico Superior. El análisis de las curvas de SEV señala que la resistividad de la capa, que dentro de la zona explorada varía entre grandes límites, no excede probablemente de 500 a 600 ohm.m. La capa 3 que solamente presenta sedimentos del tramo Bystrianski la designamos por 3'.

Capa 4. Relativamente conductora; formada probablemente por sedimentos arenisco-arcillosos tubinskicos, kojaiskicos y con frecuencia monokskicos. La resistividad de esta capa, como indica el análisis de las curvas de SEV es de 10 a 20 ohm.m.

Capa 5. De alta resistividad; se señala en las curvas de SEV en la rama final derecha, con ángulo normalmente inferior a 45° con el eje de abscisas. Se supone condicionalmente que la

estabiliza. Sólo a veces (SEV 201) para separación AB grande, se insinúa un mínimo y a continuación una subida en pendiente suave de la rama final de la curva, ligada probablemente a las capas 4 y 5. Tales curvas de SEV, que se designan como de tipo III a, evidencian un gran espesor de rocas de elevada resistividad y por consiguiente el hundimiento del horizonte de apoyo. La interpretación cuantitativa de las mismas es difícil o totalmente imposible.

Tipo IV. Las curvas de SEV de este tipo tienen aspecto de curvas de tres capas de tipo H con un mínimo suave (fig. 303 SEV 195). La magnitud $\bar{\rho}_{min}$ es del orden de 10 a 20 ohm.m, la abcisa de $\bar{\rho}_{min}$ alcanza 250 m. Las curvas de SEV de tipo IV se presentan en el área de existencia de sedimentos jurásicos (capa 2). Su rama ascendente derecha indica un paquete de alta resistividad según parece de sedimentos carboníferos y del tramo Bystrianski del Devónico Superior (capa 3). La profundidad del horizonte de apoyo del Devónico Medio no puede calcularse por las curvas de SEV de este tipo. Por consiguiente, la interpretación cuantitativa de las mismas sólo puede reducirse a la valoración de la profundidad de la superficie de los sedimentos carboníferos.

En la zona de afloramiento del Jurásico se obtienen también gráficas del aspecto de la curva de SEV 43 (fig. 303). Se puede suponer que la variación de forma de las curvas de SEV está originada aquí por la heterogeneidad eléctrica de los sedimentos jurásicos (presencia en el corte de la capa 2 de resistividad elevada). Esto ha llevado a la obtención de curvas de cuatro o cinco capas (HKH) bien definidas. La rama derecha ascendente aparentemente refleja también en este caso rocas de edad carbonífera. Las curvas de SEV de este aspecto se han agrupado en el tipo IV a.

En los sedimentos indicados del Jurásico se presentan también curvas análogas a las gráficas del SEV 198 (o SEV 197, SEV 17). La obtención de las mismas va ligada al aumento de la resistividad de las rocas curvas de SEV (se les designa como de tipo IV b) de la profundidad incluso a la superficie de los sedimentos carboníferos es a veces muy difícil. Sólo puede suponerse que la misma se hunde bastante en estos puntos.

El plano de tipos de curvas de SEV coincide en la figura 302 con el plano geológico. El análisis del plano indica que la variación del aspecto de las curvas de SEV está estrechamente relacionado con la variación de la edad de sedimentación de las rocas principales que afloran debajo de los aluviones. Las curvas de SEV de un mismo tipo coinciden en líneas generales con los afloramientos de rocas de una determinada edad.

Teniendo en cuenta las particularidades del corte eléctrico en la región investigada, se puede suponer que la aproximación del horizonte de apoyo a la superficie del terreno debe estar relacionada con el aumento de la resistividad aparente para separaciones suficientemente grandes de AB. Sobre todo, refleja claramente la variación de $\bar{\rho}$, el plano de resistividades

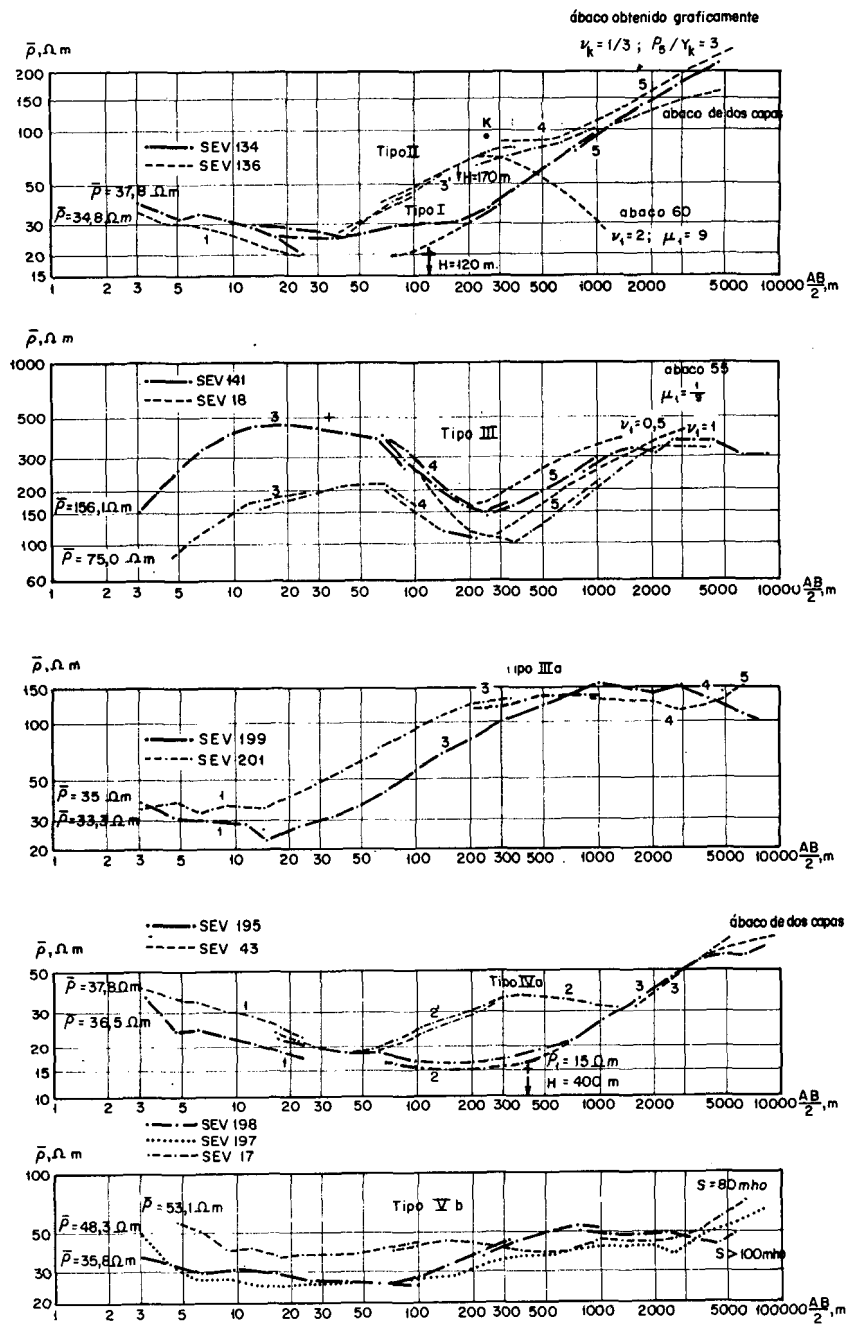


Fig. 303.—Tipos de curvas de SEV. Fosa del Norte de Minusink.

para separaciones AB de 8000 m (fig. 304). El valor máximo de la resistividad aparente ($\bar{\rho}$ superior a 200-300 ohm.m) se presenta en la parte central de la región. A partir de ella la resistividad desciende en todas las direcciones, llegando a valores mínimos (50 a 40 ohm.m) en la parte Este de la zona. Como se ve, el área de valores altos de $\bar{\rho}$ abarca las parcelas en que se presentan curvas de SEV de los tipos I y II. En ellas se tienen principalmente formaciones antiguas, lo que permite suponer el levantamiento del horizonte de apoyo de alta resistividad en las mismas. Por el contrario, se debe esperar un fuerte hundimiento del horizonte de apoyo hacia el Este. Las áreas de $\bar{\rho}$ mínimo corresponderán al afloramiento de rocas jóvenes. El levantamiento del horizonte de apoyo se extiende en dirección Sur aproximadamente.

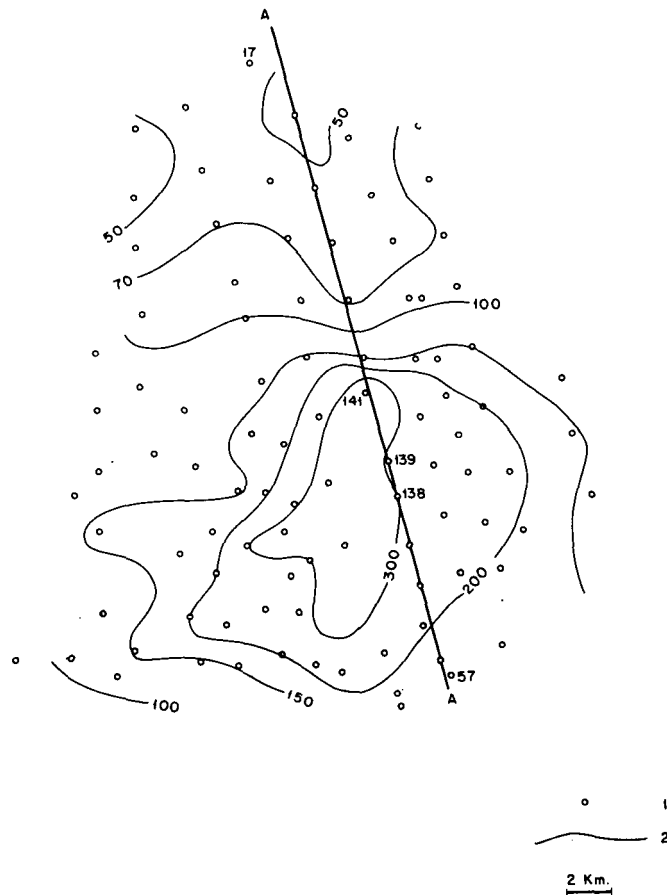


Fig. 304.—Plano de resistividades (por I. P. Lavrov) AB = 8.000 m. Fosa del norte de Minusink.
 1.—Puntos de SEV y número de los mismos (en la línea AA);
 2.—Curvas de isorresistividad.

El plano de resistividad da, por consiguiente, una primera idea aproximada de la estructura de la región.

Veamos la interpretación más detallada de las curvas de SEV. Examinemos, por ejemplo, los resultados de los SEV de la línea AA que cruza toda la zona en dirección NO-SE (fig. 304), para lo que comenzaremos por las curvas de SEV del extremo Sureste de la línea AA en que el horizonte de apoyo está más próximo a la superficie.

SEV 57 (fig. 305). Este punto de SEV se encuentra en afloramientos del tramo Tubinski. La curva es del tipo I. La rama derecha ascendente refleja claramente el horizonte de alta resistividad, y, condicionalmente, los tramos Beiski e infrayacentes. El carácter de la curva de SEV es tal que se puede interpretar con ayuda del ábaco de dos capas: $h_1 = 110$ m, $\rho_1 = 20$ ohm.m. Por consiguiente, estos parámetros sirven para valorar la profundidad H del horizonte de apoyo en el punto de SEV 57 y una cierta resistividad media de las capas de tipo conductor que descansan sobre el mismo (que por suposición son los tramos desde el Tubinski hasta Monokski inclusives).

SEV 135 (fig. 305). La curva es de tipo I. Supuesta de tres capas de tipo H y admitiendo por su aspecto $\rho_2 \approx 10$ ohm.m y $\rho_3 \neq \infty$ hallamos mediante el ábaco 83, $h_1 = 7$ m, $\rho_1 = 40$ ohm.m $h_2 = 63$ m; de aquí, $H = 70$ m. Esta es la máxima profundidad posible del horizonte de apoyo, porque el valor de ρ_2 tomado por nosotros es el máximo admisible,

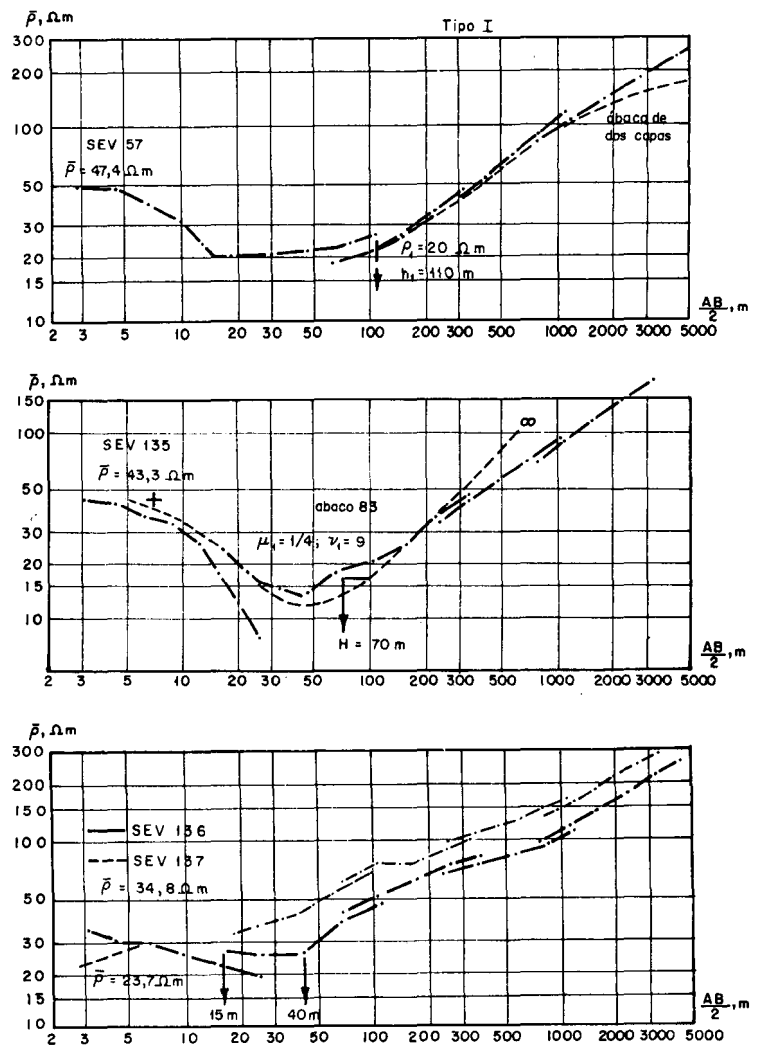


Fig. 305.—
Interpretación de
las curvas de SEV
del perfil AA.
Fosa del Norte de
Minusink.

según parece, y, además, hemos admitido que ρ_3 es infinitamente grande. Es fácil comprobar que los valores ρ_2 y h_2 corresponden a la capa 4 y los ρ_3 y H a la capa 5.

SEV 134. Suponiendo, dado el carácter de $\bar{\rho}_{min}$, que la resistividad media del paquete conductor (capa 4) es igual a 20 ohm.m (la misma que en el punto de SEV 57) hallamos con ayuda del ábaco de dos capas $H = 120$ m.

SEV 136. Punto de SEV situado en el área en que, bajo los aluviones, se encuentran rocas del tramo Bystrianski de resistividad elevada, pero cuyo valor es desconocido. Esta curva (fig. 303) pertenece al tipo II. Caracteriza bastante bien la aparición en el corte del tramo Bystrianski. Tomamos condicionalmente su resistividad igual a 300 ohm.m (este valor es elegido en virtud del análisis de todo el conjunto de curvas de SEV del tipo II). El valor de la resistividad de los tramos conductores (Tubinski y otros) que están situados debajo, lo tomamos como siempre igual a 20 ohm.m. Entonces, menospreciando la rama inicial de la curva de SEV y utilizando el ábaco 60 hallamos $h_1 = 40$ m, $\rho_1 = 23$ ohm.m (aluviones) y después del correspondiente cálculo, según el principio de equivalencia, $h'_3 = 55$ m (capa de resistividad elevada, tramo Bystrianski). Para la interpretación de la parte

derecha de la curva de SEV y para la posición encontrada del punto K ($x_K = 250$ m, $y_K = 90$ ohm.m) utilizamos ábacos de curvas de SEV de tres capas construidos gráficamente para ρ_3 igual a $1,5 \rho_1$ hasta $3 \rho_1$. Suponiendo que la resistividad de las rocas conductoras es de 20 ohm.m, después de calcular el espesor basándonos en el principio de equivalencia, en S hallamos $h_4 \approx 75$ m. De aquí $H \approx 170$ m.

SEV 137. La curva de SEV, de tipo II, corresponde al afloramiento del tramo Bystrianski. Es semejante a la curva de SEV 136 (fig. 305). La interpretación cuantitativa no es posible. Comparándola con la 136 sólo se puede deducir que la capa 3', de resistividad elevada, yace en el punto de SEV 137 más próxima a la superficie del terreno en unos 25 m (fig. 305). La profundidad del horizonte de apoyo, a juzgar por el aumento del valor de $\bar{\rho}$, es también algo menor que en el punto de SEV 136.

SEV 138. La curva de SEV es de tipo II y se diferencia poco de la curva de SEV 137 (fig. 306). Esta curva se presta mal a

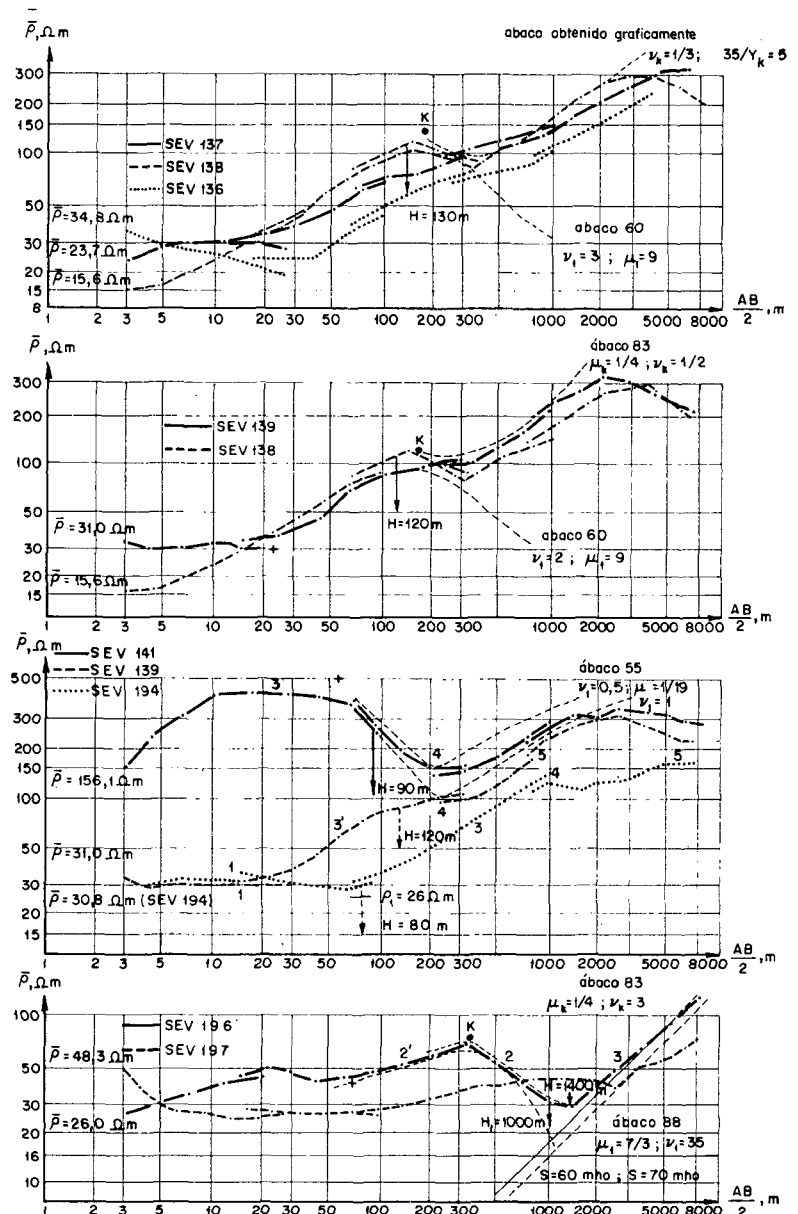


Fig. 306.— Interpretación de curvas de SEV del perfil AA. Fosa del Norte de Minusink.

la interpretación con ayuda del ábaco 60 y ábaco especialmente construido ($\mu_1 = 1/9$, $\rho_3/\rho_1 = 5$) se obtienen los siguientes resultados aproximados para valores iguales de los parámetros iniciales $\rho'_3 = 300$ ohm.m, $\rho_4 = 20$ ohm.m; $h_1 = 20$ m, $\rho_1 = 30$ ohm.m, $h_3 = 60$ m, $h_4 = 50$ m, de donde $H \approx 130$ m.

SEV 139. Este punto de SEV está situado en afloramientos del tramo Bystrianski. La curva de SEV (de tipo II) es muy semejante a la curva de SEV 138. Su interpretación con las mismas suposiciones e iguales parámetros ρ_3 y ρ_4 da $h_1 = 23$ m y $\rho_1 = 30$ ohm.m, $h_3 = 40$ m, $h_4 \approx 55$ m; $H \approx 120$ m.

SEV 141. Este punto está situado en área de afloramientos del Carbonífero. La curva de SEV 141 (de tipo III) se diferencia en su parte izquierda de la anterior curva de SEV. Se puede admitir que las rocas de edad carbonífera junto con los sedimentos del tramo Bystrianski se manifiestan como una sola capa de alta resistividad ($\rho = 460$ ohm.m). La caída de la curva está provocada, según parece, por sedimentos conductores de los tramos Tubinski e infrayacentes (capa 4). Tomando aproximadamente, por el aspecto del máximo de la curva de SEV, una resistividad media de las capas superiores igual a 500 ohm.m y conservando para la anterior el valor $\rho_4 = 20$ ohm.m, hallamos, mediante el ábaco 55 ($\mu_1 = 1/19$; $\mu_2 = 1$), $h_{1,3} = 55$ m, $h_4 = 35$ m, $H = 90$ m.

SEV 194. La curva de este SEV (tipo III) pertenece también al área de desarrollo del Carbonífero. Comparando esta curva con la anterior, vemos que el espesor de los aluviones aumenta aquí considerablemente. La profundidad de la superficie de la capa de alta resistividad (rocas del Carbonífero) se puede valorar aproximadamente con ayuda del ábaco de dos capas en 80 m. Para ello, la resistividad media de los aluviones se toma igual a unos 26 ohm.m.

La profundidad del horizonte de apoyo investigado (tramos Beiski e infrayacentes del Devónico Medio) no es posible calcularla ni en este punto ni en los siguientes: los sedimentos del Carbonífero junto con los del tramo Bystrianski, al hundirse bajo los sedimentos conductores más recientes, apantallan las capas infrayacentes.

SEV 195. Este y otros puntos de SEV de la mitad Norte de la línea del perfil quedan ya en área de afloramiento de los sedimentos jurásicos, cuyo espesor, a juzgar por el plano geológico, aumenta en la parte Norte. La curva de SEV 195 (tipo IV) evidencia en su parte izquierda un paquete conductor bastante homogéneo de aluviones y sedimentos jurásicos. Tomando su resistividad media, por el mínimo de $\bar{\rho}$, igual a 15 ohm.m, se puede valorar, con ayuda del ábaco de dos capas, la profundidad del horizonte de alta resistividad de modo aproximado (sedimentos compactos del Carbonífero) en $H \approx 400$ m (fig. 303).

SEV 196. Esta curva de SEV tiene una forma bien definida (tipo IV a). Pertenece al área de desarrollo de los sedimentos

jurásicos de fuerte espesor. Sus paquetes se diferencian aquí por la resistividad; el valor S es igual a 60 mho según la curva de SEV. Como no se conocen los parámetros, tomamos de modo condicional, según el aspecto de todas las curvas de tipo IV a, la resistividad de la capa 2' igual aproximadamente a 100 ohm.m y la de la capa 2 a 150 ohm.m.

Menospreciando la parte inicial de la curva de SEV 196, consideraremos a la misma como de cuatro capas de tipo KH. Mediante la interpretación de su parte izquierda con ayuda del ábaco 88 ($\mu_1 = 7/3$; $\mu_2 = 0$), de su parte derecha con la del ábaco 83 ($\mu_1 = 1/4$; $\mu_2 = \infty$), hallamos $h_1 = 70$ m, $\rho_1 = 40$ ohm.m, $h'_2 = 210$ m, $h_2 \approx 850$ m.

De lo anterior se deduce que la profundidad de la superficie de los sedimentos compactos del Carbonífero se valora aproximadamente en 1000 m. Teniendo en cuenta que $S = 60$ mho, se puede valorar la resistividad media longitudinal ρ_l de todo el paquete sedimentario que descansa sobre el Carbonífero en 16,7 ohm.m.

SEV 197 (fig. 306). La profundidad del Carbonífero es aquí aún mayor que en el punto de SEV 196. La resistividad del paquete jurásico es bastante mayor que en el punto de SEV 194. Suponiendo que en el punto de SEV 197 crece ρ_l hasta 20 ohm.m ($\bar{\rho}_{min}$ crece aquí aproximadamente 1,3 veces respecto a $\bar{\rho}_{min}$ en el punto de SEV 196), la profundidad del Carbonífero en el punto considerado ($S \approx 70$ mho) la valoramos de modo aproximado en $70 \cdot 20 = 1400$ m.

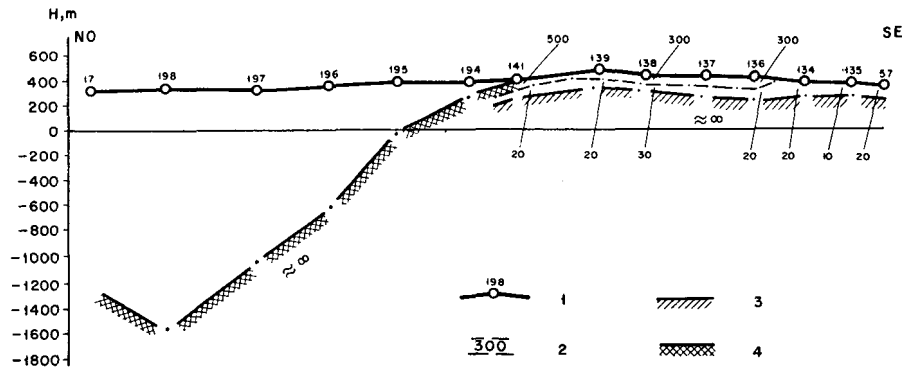
SEV 198. En este punto de SEV se aprecia (fig. 303) el hundimiento ulterior del horizonte de alta resistividad ($S > 100$ mho). Aunque el sondeo no se ha llevado aquí hasta las separaciones necesarias, se aprecia por el curso de la curva de SEV (de tipo IV b) que el horizonte de alta resistividad está aquí más profundo que en el punto de SEV 197. Si se toma en el punto de SEV 198 el valor $\rho_l = 20$ ohm.m, entonces se puede suponer que la profundidad de los sedimentos carboníferos exceden en este punto los 2000 m.

SEV 17. La curva de este sondeo pertenece al tipo IV b (fig. 303). Evidencia cierta disminución de la profundidad H del horizonte de alta resistividad (Carbonífero). El valor S es del orden de 80 mho. Para $\rho_l = 20$ ohm.m, el valor aproximado de H es de 1600 m.

Hemos considerado todas las curvas de SEV en un perfil que cruza toda la región explorada, presentando los resultados de la interpretación también de forma gráfica. El corte geoelectrico hallado para esta línea (fig. 307) caracteriza la estructura general de la región. El horizonte de apoyo de alta resistividad (tramo Beiski, condicionalmente, e infrayacentes del Devónico Medio) sólo se observa en la parte Sureste de la zona investigada. Con el hundimiento de las capas y la aparición en el corte de sedimentos jurásicos el horizonte de apoyo pasa, según parece a rocas del Carbonífero que también tiene aquí resistividad muy alta.

Fig. 307.—Corte geológico según los resultados de la interpretación de SEV (según I. P. Lavrov, año 1952). Fosa del norte de Minusink.

- 1.—Superficie del terreno. Puntos de SEV y número de los mismos;
- 2.—Límites de los horizontes eléctricos y resistividades en Ωm ;
- 3.—Superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad en el Devónico medio;
- 4.—Idem en sedimentos del Carbonífero.



Según los resultados de la interpretación se debe esperar la subida máxima de la superficie del Devónico Medio en la zona de los SEV 138-141. Después de cierta inflexión en la parte Sureste, la superficie de este horizonte parece que sube de nuevo en la parte de los SEV 134-57. Al Noroeste del punto de SEV 141 el horizonte de apoyo, junto con todo el complejo que recubre sus sedimentos se hunde más fuertemente. A partir del punto de SEV 194 sólo se observa evidentemente la superficie del Carbonífero. Con ayuda de las curvas de SEV confusas se puede admitir que su caída alcanza una profundidad máxima del orden de 2000 m, en el punto de SEV 198; a continuación, se insinúa al Noroeste de ese punto, una subida.

Tal es la interpretación cualitativa aproximada de las curvas de SEV para el perfil considerado. La misma, como es lógico, es de carácter condicional, ya que las resistividades paramétricas tomadas para la interpretación también son provisionales; el coeficiente de anisotropía de las rocas se toma igual a la unidad en todos los puntos. Además, la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad puede no corresponder en todos los casos al techo del tramo Beiskico y trasladarse al tramo Monokski del Devónico Superior que también tiene resistividad elevada. Por consiguiente, la profundidad verdadera de la superficie del horizonte de apoyo puede diferenciarse bastante de la obtenida.

Sin embargo, sí se puede admitir que la marcha general de la estructura regional expresada en los planos es cierta.

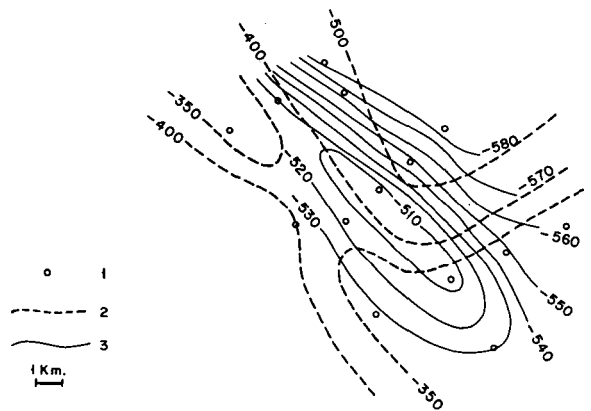
En la figura 308 está representado un plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad, para la región considerada, realizado por I. P. Lavrov. El autor tomó algunos otros parámetros condicionales

calculada estratigráficamente, lo que se pone de manifiesto al comparar el plano de distribución de las resistividades con el plano estructural confeccionado con los resultados de los sondeos mecánicos hasta el muro de los sedimentos dománicos (tramos que yacen inmediatamente del Vetlasian).

En el caso más favorable de interpretación de las curvas de SEV (en caso de que fueran conocidas las resistividades paramétricas de las capas) el plano de superficie del horizonte de apoyo, basado en la interpretación de las gráficas de SEV debería diferenciarse apenas del plano realizado según los resultados de la testificación de los sondeos mecánicos (fig. 309). Sin embargo, como vemos, el último refleja mal la verdadera estructura de la zona. El área de horizonte de apoyo elevado queda desplazada del eje de la estructura en 2 a 3 km hacia el Oeste y se subdivide en dos plegamientos, que se extienden al Sureste de modo que las isohipsas cortan bajo ángulo casi recto a las isolíneas de la superficie estratigráfica; se observa una gran diferencia entre la amplitud de la subida del horizonte de apoyo (cerca de 200 m) y de la estructura (en total unos 700 m). Es decir, se aprecia que el terreno investigado se caracteriza por un corte geoelectrico poco favorable.

Fig. 309.—Plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte eléctrico de apoyo según los resultados de la testificación de pozos, superpuesto al plano estructural de la base del dománico. Región de Ujta. Año 1949.

1.—Pozos;
2.—Isohipsas de la superficie del horizonte de apoyo eléctrico de baja resistividad;
3.—Idem de la base del dománico.

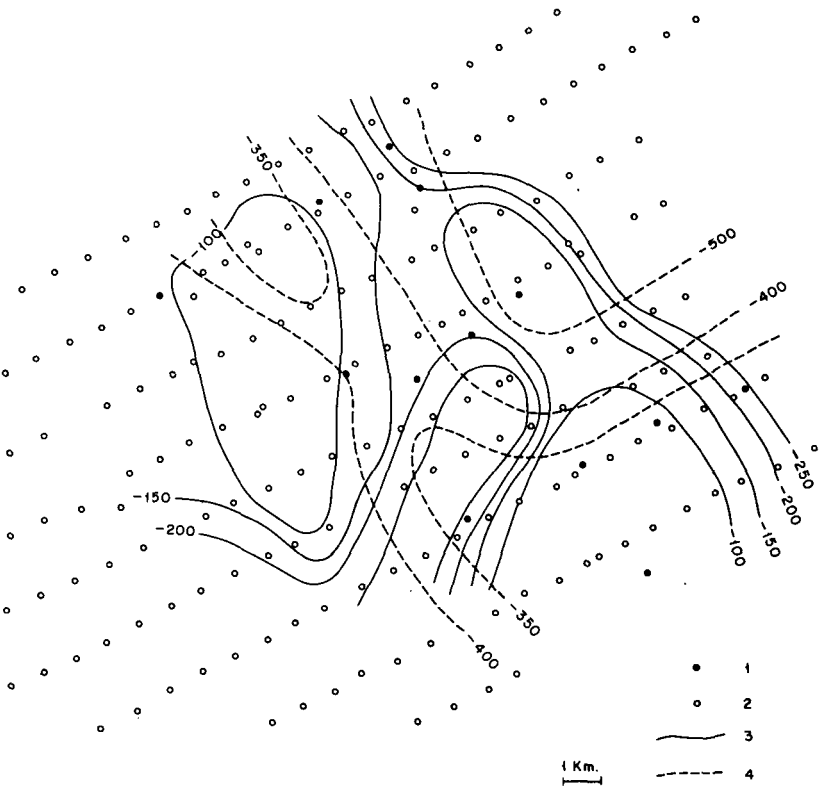


Mediante el resultado de la interpretación de las curvas de SEV realizada por el método expuesto, aún cuando los sondeos mecánicos exploratorios sólo se habían iniciado, se obtuvo otra idea de la estructura de la zona (fig. 310). Como se ve, la misma se aparta de los resultados obtenidos al interpretar los SEV en el caso más favorable, sin hablar del desacuerdo entre las conclusiones obtenidas y la tectónica real de la región. La zona de superficie del horizonte de apoyo elevada según los resultados de la interpretación se encuentra desplazada casi 5 km al Este de la posición obtenida por los

datos de la testificación; se ha trazado una flexión bastante profunda del horizonte de apoyo que en realidad no existe. Las isohipsas en ambas cartas se cortan; las cotas de la superficie del horizonte de apoyo conductor se diferencian bastante entre sí.

Fig. 310.—Plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte de apoyo conductor según los resultados de la interpretación de los SEV (por G. I. Surits) y de los datos de testificación de pozos. Región de Ujta. Año 1949.

- 1.—Pozos;
- 2.—Puntos de SEV;
- 3.—Isolíneas de la superficie del horizonte de apoyo conductor según los resultados de la interpretación de los SEV (m);
- 4.—Idem por los datos de testificación de pozos (m).



La causa de tales divergencias están en el desconocimiento de las resistividades paramétricas de las capas. Utilizando el método anteriormente considerado, el interpretador suponía, por consiguiente, la constancia de estos parámetros en toda la parcela. En realidad, como puso de manifiesto posteriormente la testificación de numerosos sondeos mecánicos, varían entre grandes límites. En la figura 311 se da un plano esquemático de los valores medios de la resistividad paramétrica ρ_{p} obtenidos por las diagráfias de todo el paquete que descansa sobre el horizonte de apoyo conductor. Como se ve, varían entre grandes límites (de 700 a 2600 ohm.m) y, al mismo tiempo, la configuración de las isolíneas de resistividad tiene gran parecido con la de las isohipsas en el plano de relieve de la superficie del horizonte de apoyo conductor según los resultados de la testificación (fig. 309). Esto explica, por consiguiente, la causa principal de la divergencia de los planos indicados con la posición real de los límites de distribución de las rocas de alta y baja resistividad. En efecto, el resultado, al suponer constante el valor de la resistividad media del paquete de sedimentos que descansa sobre el horizonte conductor (como corte eléctrico típico para el mismo se toma el corte de tipo K), el interpretador produce una exageración en el valor de la profundidad del horizonte de apoyo en las áreas en que en realidad la resistividad media es considerablemente mayor que la tomada y una disminución

en el caso opuesto. Esto se observa también en líneas generales en el plano (fig. 310).

El análisis del tema ha demostrado que si para la interpretación de las curvas de SEV realizadas en la zona se hubiera tomado el parámetro ρ , obtenido por la interpretación de las diagráfias, entonces el plano de relieve de la superficie del horizonte de apoyo conductor se habría diferenciado poco del plano estructural de la superficie de separación de las rocas de alta y baja resistividad (fig. 309). Sin embargo, el interpretador no disponía de estos datos; por tanto, sólo quedaba el camino de la interpretación de las curvas de SEV mediante el método empírico citado anteriormente, de suponer la constancia de la resistividad de todo el paquete que descansa sobre el horizonte de apoyo.

La exploración eléctrica condujo, por tanto, a una fijación inexacta del eje de la estructura existente en el terreno estudiado. El levantamiento indicado por la exploración eléctrica se encontraba desplazado de 2 a 3 km hacia el Este del eje del plegamiento real de las capas. La forma obtenida de la subida del horizonte de apoyo no corresponde a la forma de la estructura geológica. Sin embargo, la investigación eléctrica jugó en este caso un papel relevante. Por los resultados obtenidos en ella se decidió el comienzo de las perforaciones en esta zona no explorada hasta entonces y se descubrieron yacimientos gasíferos.

INVESTIGACIONES REGIONALES

Vertiente suroriental del Macizo Cristalino de Voronezh

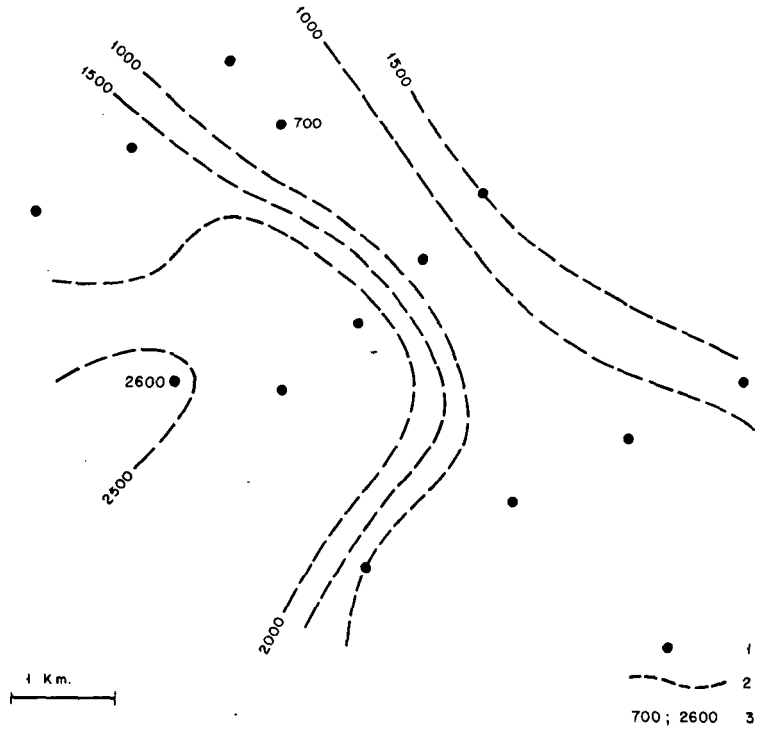
Como se ha indicado anteriormente en la investigación eléctrica realizada en la región Don-Medveditsa durante el año 1938 se realizaron algunos SEV profundos ($AB = 20$ km). Su rama derecha corresponde a un horizonte de prácticamente infinita resistividad que se suponía corresponder al basamento cristalino precámbrico. Basándose en esos datos, en el año 1953 se proyectó y realizó un SEV profundo experimental (AB hasta 30-40 km) para ver la posibilidad de un estudio regional del relieve del basamento cristalino en la región de Stalingrad y parte derecha de la de Saratov.

La investigación del año 1953 tuvo carácter de itinerario y se realizó con ayuda de estaciones de electroexploración. Uno de los perfiles de SEV (I-I en la fig. 312) de escasa longitud se situó en la parte Norte de la región plegada del Don-Medveditsa. El segundo perfil (II-II) se prolongó desde la parte Noroeste a la Sur del eje Don-Medveditsa en dirección al macizo de Voronezh, donde el basamento precámbrico yace a escasa profundidad. La distancia entre los puntos de SEV fue de 8 a 18 km.

Se obtuvieron datos del corte geoelectrónico de la región por los resultados de los sondeos mecánicos, de SEV paramétricos y

Fig. 311.—Plano esquemático de valores iguales de la resistividad media del paquete existente sobre el horizonte de apoyo conductor. Región de Ujta.

- 1.—Pozos;
- 2.—Isolíneas de la resistividad media (Ωm) según los datos de la interpretación de diagramas de testificación en los pozos;
- 3.—Valores máximos y mínimos de la resistividad.

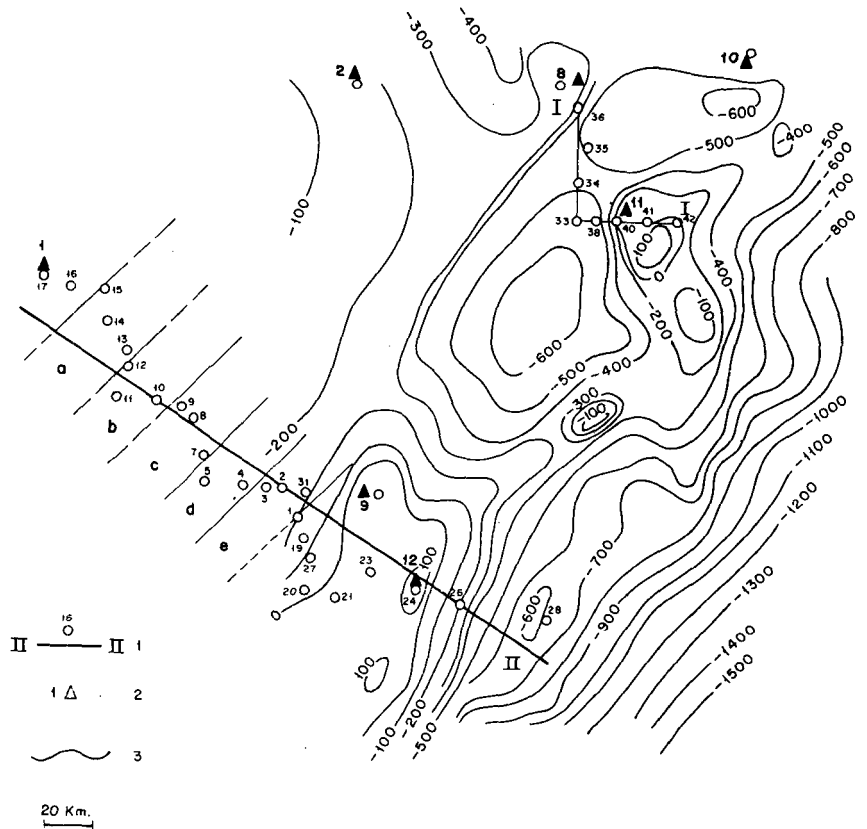


más tarde del examen de las diagráfias de doce pozos situados en la zona de exploración (fig. 312) y fuera de sus límites.

El análisis de las particularidades geoelectricas de la región estudiada demostró que la misma era bastante compleja para

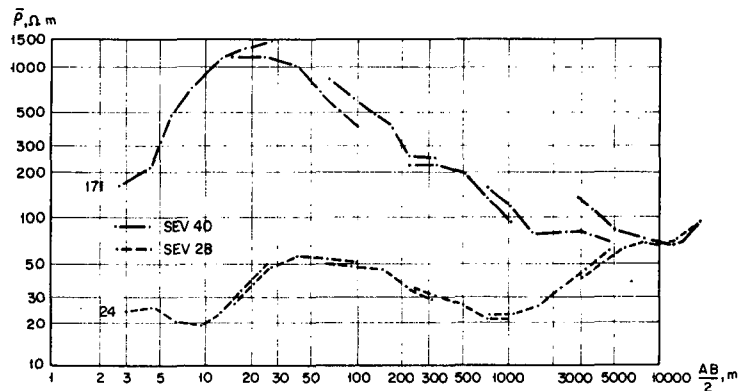
Fig. 312.—Itinerarios de investigación mediante el método de SEV profundos. Parte derecha de la zona de Stalingrad y Saratov. Año 1953.

- 1.—Puntos de SEV y dirección de los itinerarios;
- 2.—Pozos;
- 3.—Isohipsas de la superficie del Paleozoico según los datos geológicos (por S. P. Kozlenko).



la interpretación de los resultados de la exploración eléctrica profunda. En la región de investigación existe una cantidad variable de capas en el corte eléctrico de resistividades paramétricas muy variables y coeficientes de anisotropía grandes y también variables. Sin embargo, una serie de factores indicaba la posibilidad de aplicación en la misma de sondeos eléctricos profundos: 1) Para grandes separaciones AB se señala en todos los puntos de SEV un horizonte de apoyo de alta resistividad; 2) Este horizonte está relacionado en toda la zona con rocas cristalinas precámbricas a excepción de un punto (SEV 28, fig. 313) en el que la correlación estratigráfica no está completamente clara; 3) en las curvas de SEV se refleja un paquete de rocas conductor que yace directamente sobre el basamento; este paquete se señala por la caída y mínimo de $\bar{\rho}$ en las curvas de SEV antes de la rama final ascendente, cuya ordenada puede servir de referencia para la valoración de la resistividad media longitudinal de todo el paquete de sedimentos que recubre el basamento.

Fig. 313.—
Comparación de
las curvas de SEV
40 y 28 de los
itinerarios I-I y II-
II. Parte derecha
de la zona de
Saratov y
Stalingrad.



La región de trabajo se compone de rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas. Sus características geoelectricas generales pueden ser expresadas brevemente del modo siguiente (según G. A. Kartsev).

Sedimentos cuaternarios (formaciones aluviales, diluviales y morrénicas) con espesor de 30 a 100 m; resistividad, de 5 a 150 ohm.m.

Sedimentos terciarios (tierras de moldeo, areniscas, arenas cuarcíferas, arcillas) su desarrollo no es general. Su espesor llega a veces a 200 m; la resistividad, de 10 a 30 ohm.m.

Sedimentos cretácicos en sus partes Superior e Inferior. El Cretácico Superior (arcillas, margas, tierras de moldeo, areniscas, arenas, calizas litográficas) tiene un espesor de 90 a 270 m. Su resistividad es muy variable. Las arcillas y margas indican resistividades de 8 a 30 ohm.m; las arenas, areniscas y calizas litográficas, de 50 a 250 ohm.m. El espesor del Cretácico Inferior (arenas, areniscas, arcillas) es de 100 a 220 m; su resistividad, de 30 a 100 ohm.m.

Los sedimentos jurásicos presentan su parte superior y media (arcillas, margas, arenas); su espesor es de unos 200 m; su resistividad, de 5 a 15 ohm.m.

Los sedimentos de edad carbonífera (calizas, dolomías, rocas arenisco-arcillosas) presentan en toda la zona de trabajo sus tres tramos. Las calizas del Carbonífero Superior y Medio afloran en algunos puntos. El espesor total de los sedimentos del Carbonífero oscila entre amplios límites llegando a 1000-1800 m y más. Las calizas y otras rocas carbonatadas se caracterizan por resistividades de hasta 150-500 ohm.m y más, los paquetes terrígenos por 3 a 10 ohm.m.

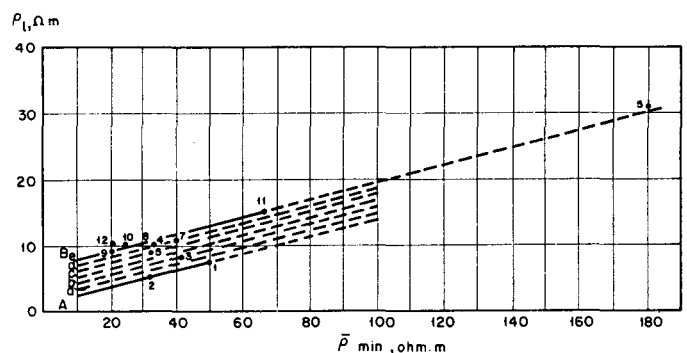
El espesor de los sedimentos del Devónico Superior y Medio (pizarras arcillosas y calcáreas, calizas y arcillas) va de 170 hasta 2100 m. La resistividad de la parte superior de estos sedimentos complejos es de 70 a 300 ohm.m, de la más baja de 8 a 10 ohm.m.

Las rocas cristalinas del Precámbrico tienen resistividad prácticamente infinita.

Las curvas de SEV que reflejan este corte geológico complejo y variable son de capas múltiples y de forma muy diversa. Únicamente tienen todas estas curvas en común la característica de que su rama final derecha forma ángulo de 45° con el eje de abscisas, expresándose el mínimo de $\bar{\rho}$ antes de la subida de modo más o menos claro.

Para la mayor parte de las curvas de SEV halladas es prácticamente imposible dar una interpretación cuantitativa con ayuda de los ábacos. Por consiguiente se utilizaron para la interpretación una serie de datos obtenidos en sondeos mecánicos realizados en la zona de Stalingrad y Saratov. Por los valores así conocidos de la profundidad de la superficie del Basamento Cristalino (confirmados directamente de los pozos perforados o supuestos, si los mismos no alcanzaron el basamento) y los valores de S obtenidos de las curvas de SEV realizadas junto a los mismos, se calcularon las resistividades longitudinales medias de todo el paquete de sedimentos que yace sobre el Basamento. A continuación, de los impresos de estas mismas curvas de SEV se obtuvieron los valores de $\bar{\rho}_{min}$ fijando las relaciones empíricas entre las magnitudes ρ_l y $\bar{\rho}_{min}$ de las curvas de SEV paramétricas. En la tabla 59 se indican todos los valores citados.

Fig. 314.—
Relación entre ρ_l
y $\bar{\rho}_{min}$ en las
curvas de SEV
profundas (por F.
T. Shcherbakov).
Parte derecha de
la zona de
Stalingrad y
Saratov.



Los puntos que expresan la relación entre $\bar{\rho}_{min}$ y ρ_L (fig. 314) quedan dispuestos en las proximidades de dos rectas A y B paralelas. En la primera se engloban los puntos correspondientes a los pozos 1, 2 y 3; en la segunda, los restantes.

TABLA 59

RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE LOS DATOS DE SONDEOS MECANICOS Y SEV PARAMETRICOS

Pozo núm.	H (m)	S	ρ_L (ohm.m)	$\bar{\rho}_{min}$ (ohm.m)
1	340	44	7,7	50
2	1350	240	5,6	33
3	2004	240	8,4	42
4	2600	255	10,3	33
5	2635	85	31,0	180
6	2642	285	9,3	32
7	2700	250	10,8	40
8	2750	255	10,8	32
9	3000	320	9,4	20
10	3015	300	10,0	24
11	3300	220	15,0	66
12	3700	360	10,3	21

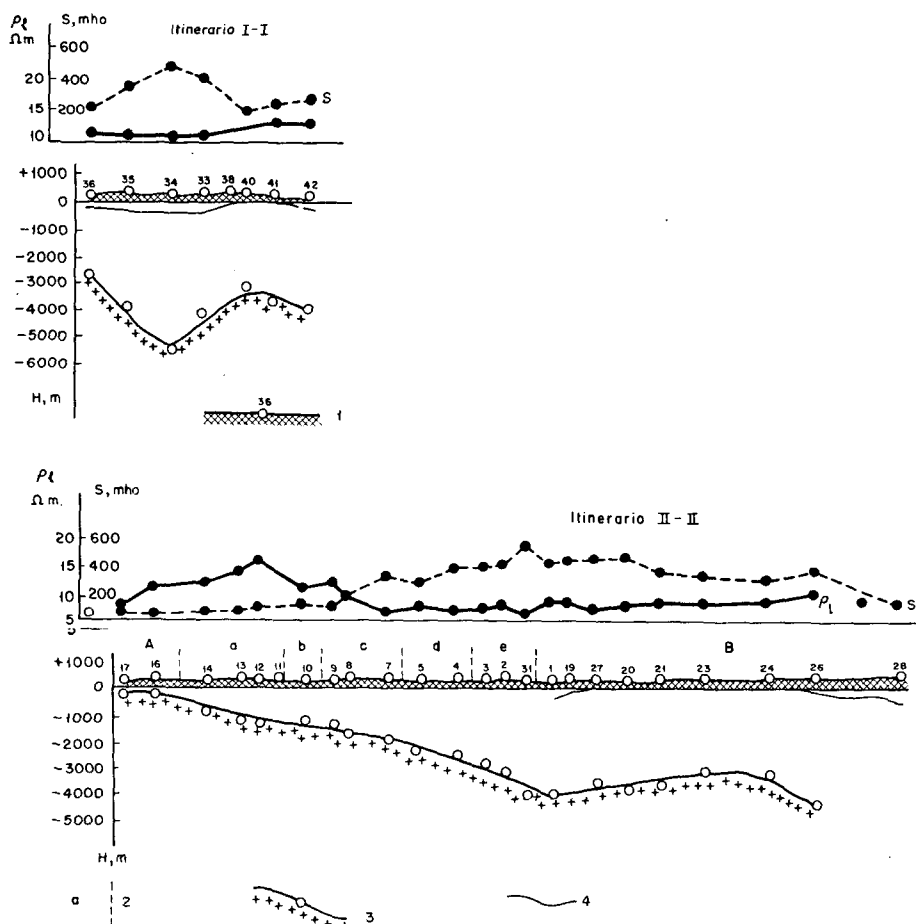
El cálculo de la profundidad de la superficie del Basamento para las curvas de SEV con ayuda de los gráficos obtenidos no presenta dificultad. De la curva de SEV que se interpreta se obtiene el valor de $\bar{\rho}_{min}$; de él, mediante la gráfica A o B (fig. 314), según la proximidad a uno de los dos grupos de pozos, se valora ρ_L y conocida la magnitud S en dicho punto se calcula $H = \rho_L \cdot S$. Por ejemplo, todos los puntos de SEV del itinerario I-I (fig. 312) quedan en la misma zona que los pozos 8, 10 y 11. Por consiguiente, para el cálculo de ρ_L en estos puntos hay que utilizar el gráfico B. Más compleja es la interpretación de las curvas de SEV para el itinerario II-II a este respecto. En él los puntos correspondientes al pozo I en la parte Noroeste del itinerario están en la recta A, los puntos relacionados con el pozo 9 y con el 12 en la parte Sureste pertenecen a la recta B. De todo esto se deduce que no es posible interpretar todas las curvas de SEV del itinerario con ayuda de una cualquiera de las relaciones entre ρ_L y $\bar{\rho}_{min}$ sacadas de los gráficos. Está claro que para la interpretación de las curvas de SEV situadas en la parte Noroeste del itinerario hay que utilizar el gráfico A y en la Sureste el gráfico B. Para evitar la transición brusca de un gráfico a otro se llevaron (elegidas arbitrariamente) cinco rectas paralelas intermedias. Este número de rectas, tomado por los autores de la interpretación, lo fue con objeto de que la exactitud del cálculo de ρ_L y $\bar{\rho}_{min}$ sea del orden de $\pm(5-10)\%$.

Para el cálculo de ρ_L al avanzar a lo largo del itinerario II-II desde la parte más superficial del basamento a la más profunda el mismo se dividió en siete intervalos (fig. 312).

Las curvas de SEV 16 y 17 próximas al pozo 1 se interpretaron con ayuda de la gráfica A, el resto del itinerario hasta el punto de SEV 1 situado junto al pozo 9, se dividió en cinco partes aproximadamente iguales (parcelas a-e) y para la interpretación en cada una de ellas de las correspondientes gráficas de SEV se utilizó el espacio adecuado del gráfico. El SEV 1 y todos los situados al Sureste del mismo se interpretaron con ayuda del gráfico B.

Los resultados de la interpretación se muestran en la figura 315. Como se ve, el corte geoelectrico da en ambos itinerarios de SEV una idea totalmente clara de las líneas generales de la estructura de la superficie del horizonte de apoyo correspondiente al basamento cristalino precámbrico. Según los resultados de los SEV, el mismo se hunde aquí en algunas áreas hasta profundidades de 4 a 5 km y más.

Fig. 315.—Cortes esquemáticos según los resultados de la interpretación de curvas de SEV profundos (según F. T. Shcherbakov). Parte derecha de la zona de Stalingrad y Saratov.
 1.—Superficie del terreno, puntos de SEV y número de los mismos;
 2.—Designación de los gráficos para las que se ha realizado la interpretación de las curvas de SEV;
 3.—Profundidad del horizonte de apoyo, calculada por los resultados de la interpretación de SEV;
 4.—Superficie del Paleozoico.



El valor de ρ_t en las áreas de hundimiento del basamento disminuye en ambos itinerarios. Así, en el itinerario I-I el valor de ρ_t es de unos 13 a 15 ohm.m en las áreas levantadas mientras que es de 10 a 11,5 ohm.m en las más hundidas. En el itinerario II-II en la parte Noroeste en que el yacente está más somero, ρ_t llega a 15-16 ohm.m, y conforme se va hundiendo el mismo la resistividad media llega a 11-7 ohm.m.

En las figuras 316 y 317 se tiene una serie de curvas de ambos itinerarios. Se aprecia que es difícil por lo inexpresivo de la forma de la gráfica de SEV en muchos casos, llegar a

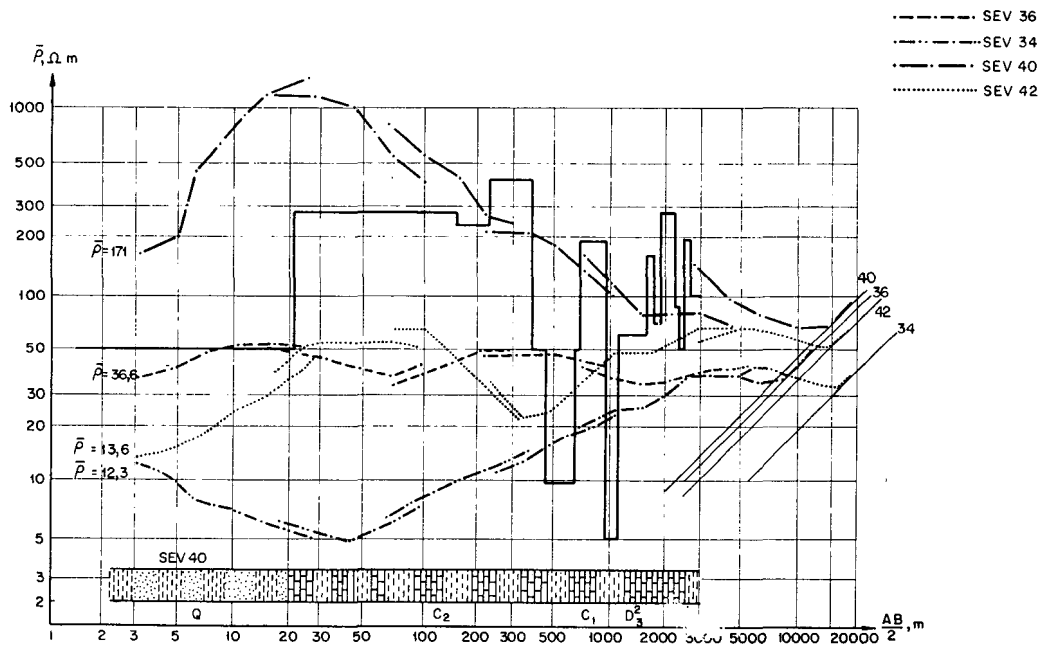
una idea clara de tipo cualitativo de la variación de la profundidad del horizonte de apoyo.

La exactitud de la interpretación aproximada calculan los autores es del orden de $\pm 20\%$.

El estudio ha señalado que en la región considerada se puede definir en principio con ayuda del método de SEV el relieve de la superficie del Basamento Precámbrico a grandes rasgos. Su definición es de extraordinaria importancia para el encauzamiento de las prospecciones y exploración en los trabajos de petróleo y gas. Hay que hacer constar que dentro de los límites indicados de plegamiento de la superficie del Basamento existen grandes yacimientos de petróleo.

Para mayor exactitud de los resultados de la exploración eléctrica sobre la investigación del Basamento Cristalino es conveniente completar la misma con una campaña de exploración sísmica por el método de refracción.

Fig. 316.—Curvas de SEV profundos en el itinerario I-I (por G. A. Kartsev y F. T. Shcherbakov). Parte derecha de la zona de Saratov y Stalingrad. Año 1953.



Analicemos finalmente la causa de la disminución brusca del valor de S en la curva de SEV 28 (fig. 317) situado al extremo Sureste del itinerario II-II. En los puntos de SEV 24 y 26, S es igual a 360 y 400 mho respectivamente; en el último punto del itinerario es de 190 mho. Teniendo en cuenta que en la curva de SEV 28 es $\rho_{min} = 65$ ohm.m, hallaríamos mediante el gráfico B, $\rho_r = 15$ ohm.m y $H = 3000$ m, es decir, obtendríamos una nueva subida del basamento después de su hundimiento en el punto de SEV 26 hasta unos 4500 m. Sin embargo, ello va en contra de la idea geológicamente establecida del hundimiento gradual de las capas al Este del SEV 26. Es, por tanto, más lógico suponer que en el punto de SEV 28 la rama ascendente final de la curva de SEV no señala el Basamento Cristalino Precámbrico que en este punto se hundirá a gran profundidad, sino un horizonte superior de

muy alta resistividad más moderno que se evidencia en el corte a causa del descenso del Basamento. Sin embargo, tampoco la primera suposición se puede descartar por el aspecto de la curva misma de SEV 28 ni por comparación con otras curvas contiguas (fig. 317) y más alejadas (por ejemplo, la curva de SEV 40 del itinerario I-I; fig. 313). Este interrogante de la fijación estratigráfica del horizonte de apoyo en la parte extrema Sureste del itinerario II-II tal vez podría resolverse con ayuda de algunos SEV realizados al Este de dicho punto de SEV 28.

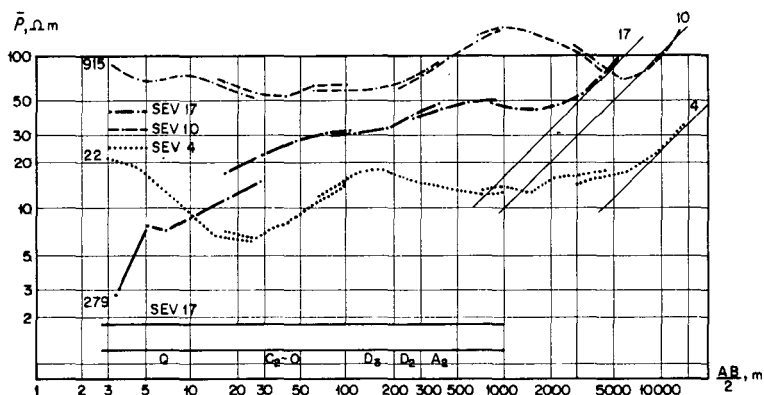
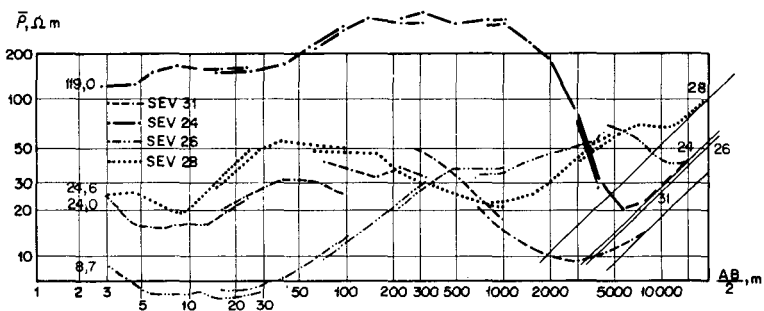


Fig. 317.—Curvas de SEV profundos en el itinerario II-II (por G. A. Kartsev y F. T. Shcherbakov). Parte derecha de la zona de Saratov y Stalingrad. Año 1953.



Franja meridional de la fosa Dnieper-Donets

Examinaremos un ejemplo de interpretación de curvas de SEV realizadas para el estudio de la posición de la superficie del horizonte de apoyo profundo (Basamento Cristalino o paquete de sedimentos carbonatados y salíferos devónicos) en la parte Sur de la fosa Dnieper-Donets. Se realizaron en esta ocasión SEV con separaciones AB de hasta 20 km utilizando estaciones de exploración eléctrica.

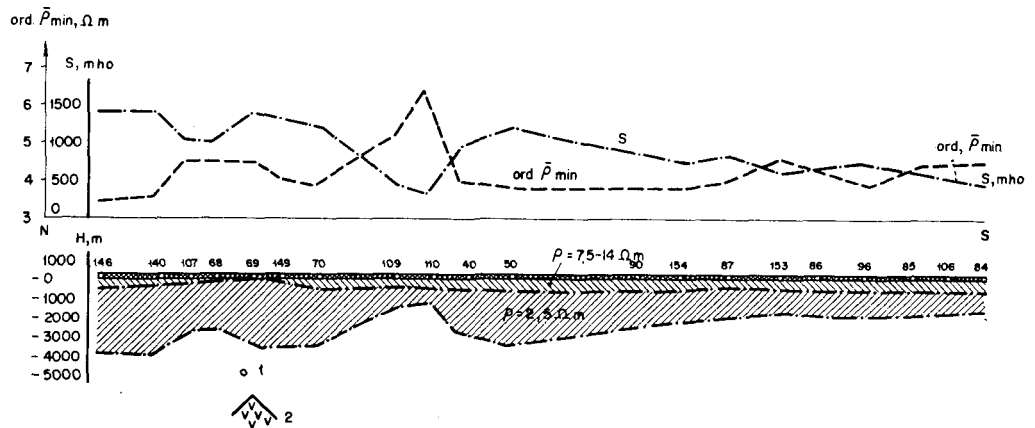
En el territorio estudiado y zonas colindantes existen ya realizados sondeos mecánicos. El análisis de los diagramas de la testificación junto con los datos de la interpretación de las curvas da las características siguientes del corte geoelectrico típico de la zona investigada (fig. 318).

Capa 1. Sedimentos del Cuaternario (formación de loess, arcillas) y de parte del Terciario (arcillas); tienen espesor variable (de 1 a 50 m) y también resistividad variable (20 a 1200 ohm.m).

Capa 2. Paleógeno Inferior (arenas, margas) y posiblemente parte superior del Cretácico o Jurásico (calizas litográficas, arenas, arcillas). Su espesor es de hasta 75 m; su resistividad, de 20 a 800 ohm.m.

Capa 3. No está presente en toda la zona. Pertenece, probablemente, a rocas cretácicas. Por los datos de la testificación se obtiene una resistividad de la misma de 40 a 50 ohm.m. En las curvas de SEV normalmente no se refleja individualmente, englobándose con la capa 4 infrayacente en la rama descendente (SEV 40 en fig. 319) o en el máximo de $\bar{\rho}$ junto con la capa 2 (SEV 107).

Fig. 318.—Corte geoelectrico según los resultados de interpretación de las curvas de SEV. Borde meridional de la fosa Dnieper-Donets (por V. M. Ruchko y P. I. Nekrashevich).
1.—Puntos de SEV y número de los mismos;
2.—Superficie del horizonte eléctrico de apoyo.



Capa 4. Corresponde, según parece, a un potente paquete (de hasta 700 m) arenisco-arcilloso jurásico de escasa resistividad (5 a 14 ohm.m). En la mayoría de las curvas de SEV, la capa 4 se señala por una cierta estabilización de la rama descendente (SEV 40), a la que sigue una caída más fuerte de la misma hasta el mínimo de la gráfica de SEV.

Capa 5. Está vinculada a rocas conductoras del Permo-Trías y Carbonífero (arenas, arcillas, areniscas) muy saturadas de aguas mineralizadas. Su espesor, frecuentemente, rebasa de 2000 a 3000 m; su resistividad, según la interpretación de las curvas de SEV paramétricas, se toma igual a 2,5 ohm.m en toda la región explorada. En las curvas de SEV la capa 5 se refleja por la caída claramente expresada de $\bar{\rho}$.

Capa 6. De resistividad prácticamente infinita. Sirve de horizonte de apoyo eléctrico. Corresponde generalmente al Basamento Cristalino Precámbrico. Sin embargo, no se excluye la posibilidad de que en las zonas de hundimiento considerable del mismo, la capa 6 pueda comprender también sedimentos carbonatados y halógenos del Devónico.

La rama derecha de todas las curvas de SEV forma ángulo de 45° con el eje de abscisas, lo que facilita mucho la interpretación cuantitativa.

La forma de las curvas de SEV varía muy poco, pudiendo las mismas subdividirse en dos tipos. El primero corresponde al aspecto de la gráfica del SEV 40 (tipo KQQH) citado en la

figura 319. En las curvas de este tipo se reflejan de modo más o menos claro todas las capas del corte eléctrico estudiado. Al tipo segundo se atribuyen las curvas análogas a la del SEV 107 (fig. 319). Se caracterizan por un máximo de $\bar{\rho}$ expresado muy claramente y desplazado considerablemente a la derecha respecto a su posición en las curvas de SEV del tipo I y con una rama monótonamente descendente que corresponde a las 4 y 5 marcadas como un horizonte conductor. La capa 1 se subdivide en dos (1 y 1 a) en caso de aumento de su espesor. Por consiguiente, en este caso, la profundidad de la capa 2 también aumenta. El análisis de las curvas de SEV demuestra que junto con ello también aumenta el espesor de la capa 2 (posiblemente está relacionado con esto su unión con la capa 3), así como su resistividad. Por estas causas, las capas 4 y 5 se reflejan en las curvas de SEV de tipo II como un horizonte conductor.

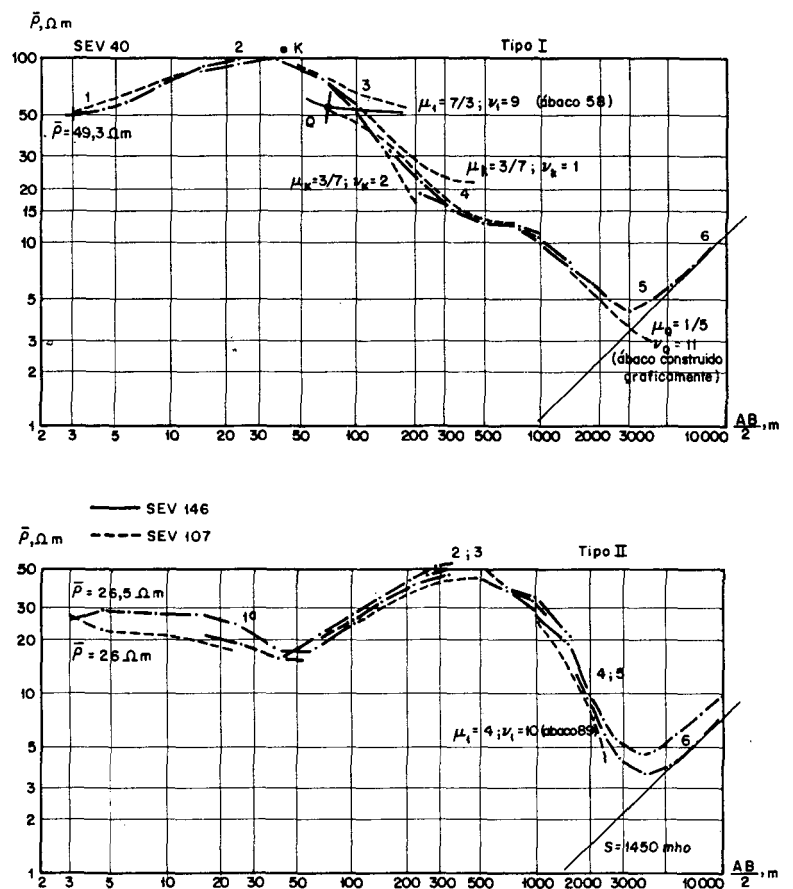


Fig. 319.—Tipos de curvas de SEV en la zona del borde meridional de la fosa Dnieper-Donets e interpretación de las mismas (por V. M. Rusko y P. I. Nekrashevich, año 1950.

El valor de la abcisa del punto $\bar{\rho}_{min}$ de las curvas de SEV de ambos tipos anterior a la rama final conductora oscila entre 2000 y 6000 m; el valor de $\bar{\rho}_{min}$ es bastante constante, variando principalmente de 3,5 a 4,5 ohm.m; sólo en casos especiales sube a 5 y 6,5 ohm.m.

Las curvas de SEV de cada tipo se distribuyen de modo regular. La zona en la que se observan curvas de SEV de tipo I coincide con la parte Sur, en tanto que las de tipo II lo hacen con la parte Este de la región. Como evidencian los sondeos mecánicos, el espesor de los sedimentos es mucho mayor en la parte Este que en la Sur.

Para la interpretación cualitativa se realizaron planos de resistividad, de posición de los puntos extremales de las curvas de SEV y otros. Veamos uno de ellos, el plano de la conductancia longitudinal total (fig. 320). El valor de S varía en la zona investigada entre grandes límites, aumentando de Sur a Este de 500 a 1600-1700 mho. Sobre esta tendencia de tipo general se definen algunas áreas claramente definidas de valores de la conductancia más bajos y más altos.

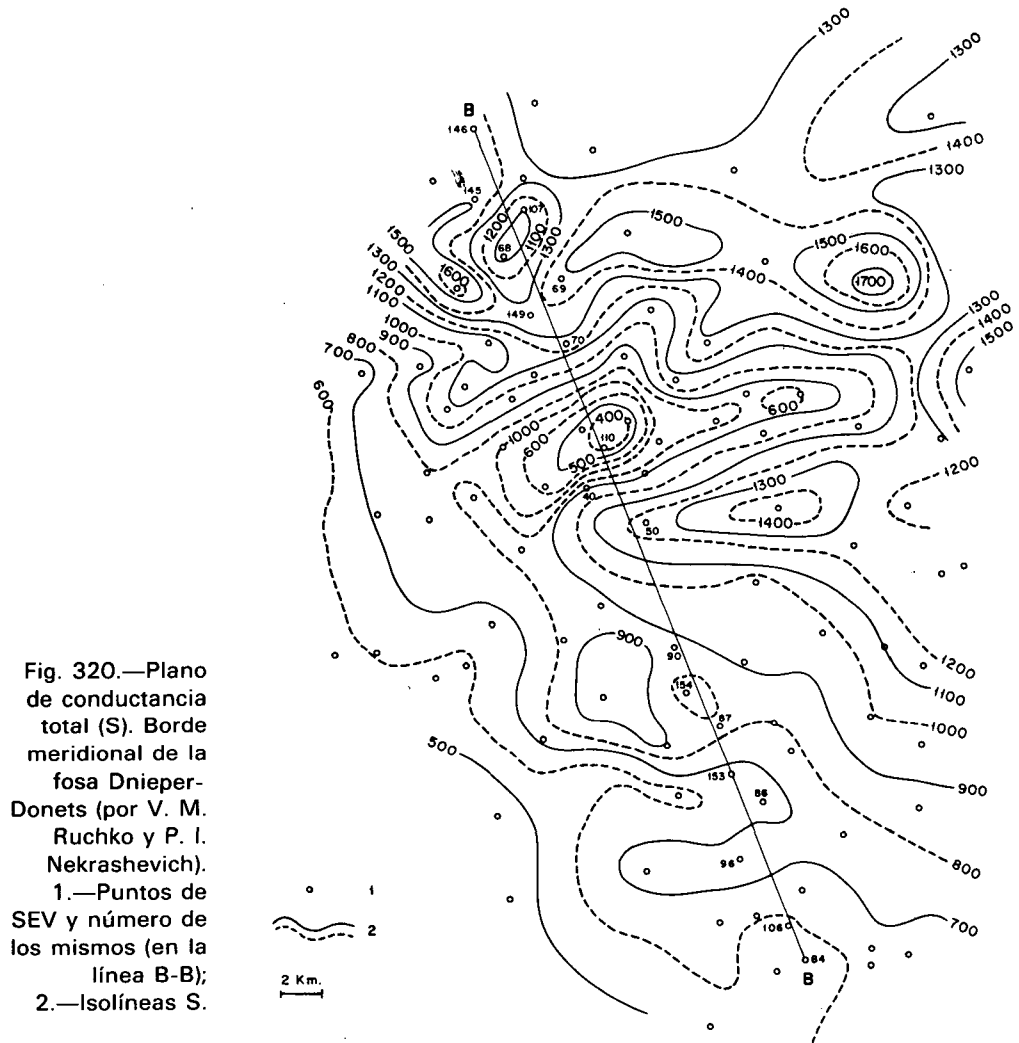


Fig. 320.—Plano de conductancia total (S). Borde meridional de la fosa Dnieper-Donets (por V. M. Ruchko y P. I. Nekrashevich).
1.—Puntos de SEV y número de los mismos (en la línea B-B);
2.—Isolíneas S.

Teniendo en cuenta que la capa 5 es la más potente y conductiva del corte, se puede suponer que la variación de los parámetros de la misma influye de modo predominante en la variación de S. Y puesto que la resistividad de esta capa es sensiblemente constante en toda la región explorada, según los datos de la testificación, es perfectamente admisible interpretar las áreas de valores mínimos de la conductancia como de horizonte de apoyo de alta resistividad elevado y las áreas de S máximo como de acumulación de sedimentos conductores de gran espesor, es decir, de hundimiento del horizonte de apoyo.

Por consiguiente, la interpretación cualitativa de los planos de S se reduce a suponer que existe un hundimiento general considerable del horizonte de apoyo, en dirección Este. En la

zona hundida cabe esperar la presencia de una serie de levantamientos y repliegues parciales de dicha superficie del horizonte de apoyo. Es digna de la mayor atención el área de pequeños valores de S contorneada por las isóneas 400 y 800 mho situada aproximadamente en la parte central de la zona explorada.

Es esencial para la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV el cálculo de la resistividad paramétrica de la capa conductora 5 que descansa directamente sobre el horizonte de apoyo. Ya se ha dicho que, por el análisis de la testificación y de los SEV paramétricos, se tomó constante e igual a 2,5 ohm.m. Este mismo estudio, junto con el examen de todo el material de SEV para la región, lleva a la conclusión de que la resistividad de la capa 4 varía, según parece, entre 7,5 y 14 ohm.m. Mediante la serie de curvas de SEV con su parte central estabilizada se puede obtener una idea clara de la resistividad de la capa 4 (ver, por ejemplo, SEV 40 en la fig. 319). Tales curvas de SEV sirven de base para el cálculo del parámetro ρ_4 . En los puntos de SEV intermedios se puede obtener su valor mediante interpolación.

La capa 3 no puede observarse siempre en las curvas de SEV. Para la interpretación (si se refleja de algún modo en la curva de SEV) tomábase su resistividad igual a 40-50 ohm.m en virtud de los datos de la testificación, aunque lo más frecuente es que dicha capa se englobe con la 4 o la 2. Para las curvas de SEV del tipo II se englobó, como ya se ha dicho, la capa 4 y la 5 en una sola de resistividad 2,5 ohm.m.

La resistividad paramétrica de la capa 2 se calcula de modo aproximado por el aspecto del máximo de las curvas de SEV. El error en la valoración de su espesor, evidentemente, no influirá de modo importante en el resultado final de la interpretación.

En la figura 319 se tienen ejemplos de interpretación cuantitativa de curvas de SEV de ambos tipos. Veámoslos con más detalle.

SEV 40. Por la forma del máximo, en pendiente suave, de la parte izquierda de la curva de SEV se puede admitir que $\rho_2 = 120$ ohm.m.

Utilizando el ábaco 58 ($\mu_1 = 7/3$; $\mu_2 = 1$) y suponiendo que $\rho_3 = \rho_1 = 50$ ohm.m, hallamos ($\nu_1 = 9$),

$$\begin{array}{ll} h_1 = 3 \text{ m,} & \rho_1 = 50 \text{ ohm.m} \\ h_2 = 27 \text{ m,} & \rho_2 = 120 \text{ ohm.m} \\ x_K = 34 \text{ m,} & y_K = 110 \text{ ohm.m} \end{array}$$

De este modo, reducimos la curva de SEV a otra de cinco capas de tipo QQH. Interpretamos su parte media suponiendo que $\rho_3 = 50$ ohm.m, $\rho_4 = 12$ ohm.m (para la parte estabilizada de la rama descendente). Entonces, $\mu_K = \rho_3 / y_K = 0,45$; $\rho_4 / y_K = 0,11$. Por este valor de μ_K se podría tomar para la interpretación de esta parte media de la curva el ábaco 64 o

el 76 ($\mu_1=0,43$), pero para la primera el parámetro μ_2 es grande ($\mu_2=0,18$) y para la segunda es muy pequeño ($\mu_2=0$).

Si tomamos un promedio de los resultados de estos ábacos probablemente no cometeremos grandes errores. Para el primer ábaco tenemos $\nu'_k=1$ y para el segundo, $\nu''_k=2$. Tomando $\nu_k=1,5$ hallamos $h_3=\nu_k \cdot x_k=50$ m; $\rho_3=$ ohm.m. De aquí y con ayuda del ábaco Q calculamos la posición del segundo punto inicial para la interpretación.

$$x_0=70 \text{ m}; \quad y_0=55 \text{ ohm.m}$$

La curva de SEV dada se reduce entonces a otra de cuatro capas de tipo QH:

$$\mu_0=0,22; \quad \rho_5/y_0=2,5/55=0,047$$

En la colección no existe el ábaco correspondiente a estos parámetros. Lo obtendremos gráficamente. Interpretando a continuación con ayuda de este ábaco nuestra curva tendremos $\nu_0=11$. Esto nos lleva a $h_4=\nu_0 \cdot x_0=770$ m para $\rho_4=12$ ohm.m. La suma de las conductancias de las capas 1-4 es $0,06+0,23+1+64=65,3$ mho. Teniendo en cuenta que la conductancia total del corte es $S=970$ mho, hallamos $S_5=S-S_{1-4}\approx 905$ mho. El espesor de la capa h_5 se calcula entonces por $h_5=S \cdot \rho_5=2250$ m.

Por tanto, la profundidad del horizonte de apoyo de resistividad infinitamente grande para la curva de SEV considerada se calcula en 3100 m aproximadamente.

Se comprende fácilmente que el error más considerable de la interpretación está relacionado con el error cometido en la valoración del parámetro ρ_4 y principalmente del ρ_5 . Los errores del mismo signo producen errores de signo opuesto en la valoración de h_4 y h_5 ; por consiguiente, el error total disminuirá. El error será máximo para el caso de errores parciales de distinto signo. Si se supone como probable un error en la valoración de los parámetros del 10 al 15%, pero con signo distinto, entonces el error relativo en la interpretación también será de ese orden. Por consiguiente, el error absoluto máximo en el cálculo de H puede ser en este caso de unos 400 a 500 m.

SEV 146. La interpretación de las curvas de este tipo es mucho más sencilla que en el caso anterior. Se puede desprestigiar la rama inicial de la curva de SEV sin perjuicio para la exactitud de la interpretación y tomando por el aspecto del máximo de la curva $\rho_{2,3}=60$ ohm.m, hallamos (fig. 319) con ayuda del ábaco 89 ($\mu_1=4$; $\mu_2=0$); $h_1=50$ m, $\rho_1\approx 15$ ohm.m, $h_{2,3}=10$ $h_1\approx 500$ m. De aquí, $S_1+S_{2,3}=12$ mho y como $S=1450$ mho, tendremos $S_{4,5}=1430$ mho.

Los autores de la interpretación también toman en este caso, como ya hemos dicho, de modo condicional la resistividad de la capa conductora igual a 2,5 ohm.m. En realidad, ello no es completamente exacto, si se parte de la suposición de que la

rama descendente de la curva de SEV refleja ambas capas, 4 y 5. Como parámetro inicial habría que tomar aquí la resistividad media longitudinal de estas capas calculada como $\rho_{4,5} = (h_4 + h_5) / (S_4 + S_5)$. Y a causa de que el espesor de ambas capas y la resistividad ρ_4 varía de un punto de SEV a otro, también varía el valor $\rho_{4,5}$. Sin embargo, evaluar dicha variación no es posible. Por consiguiente, se toma la resistividad total de las capas 4 y 5 condicionalmente invariable e igual a la resistividad de la capa conductora 5 en toda la zona explorada. A causa de ello, el valor obtenido de la profundidad del horizonte de apoyo en el área de presencia de las curvas de SEV del tipo II puede ser disminuida en cierta medida y el relieve de la superficie desnivelado. En la interpretación práctica tales alteraciones del resultado son frecuentemente inevitables a causa de la falta de datos de las resistividades paramétricas.

El espesor de la capa 4-5 en el punto de SEV considerado, se calcula como $h_{4,5} = 1438 \cdot 2,5 \approx 3600$ m. La profundidad de la superficie del horizonte de apoyo es del orden de 4000 m. En condiciones favorables el orden del error relativo puede ser en este caso del mismo orden que en el caso anterior.

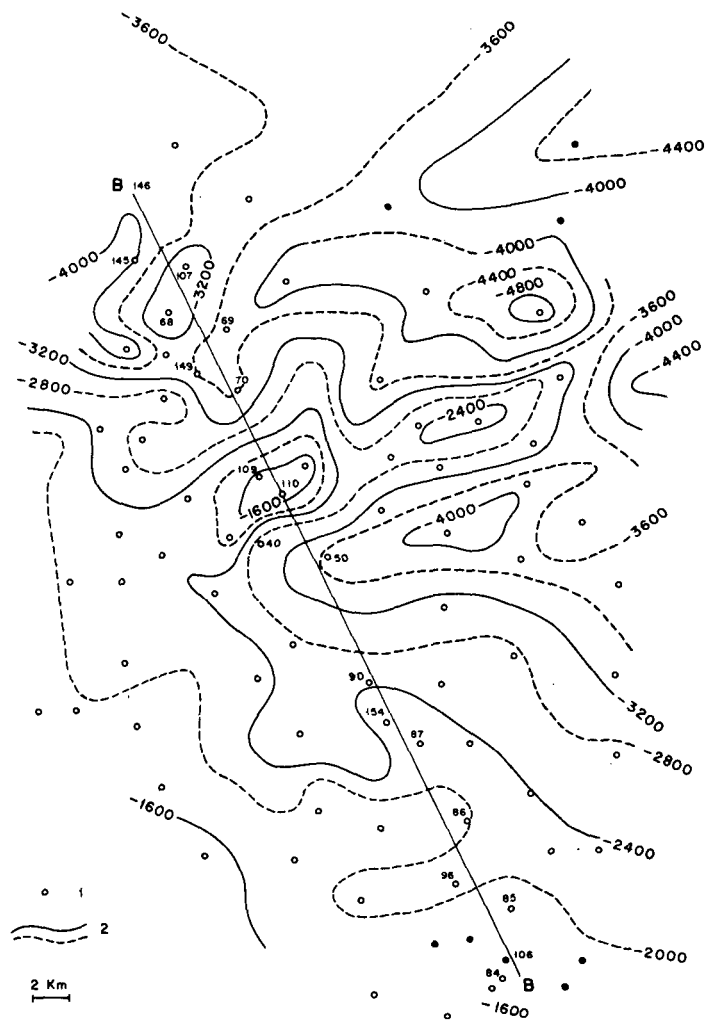
En la figura 321 se tiene un plano del relieve de la superficie del horizonte de apoyo según los resultados de la interpretación de las curvas de SEV. Este plano tiene bastante en común con el plano de S. La superficie del horizonte de apoyo se hunde en dirección Norte desde la cota -1500 m hasta la -4000 m y más. En la mitad Norte de la región se observa una zona de levantamiento (cota de -2000 a -1500 m aproximadamente) orientada casi en sentido de la latitud. Al Norte y Sur lindan con ella áreas de superficie del horizonte de apoyo profunda (hasta -4000 y -5000 m). Se ve, por tanto, que el plano da una idea general completamente clara de la posición del horizonte de alta resistividad que yace debajo del potente paquete sedimentario.

Examinemos el corte geoelectrico de la región investigada a lo largo de la línea BB (figs. 318 y 321) de modo conjunto con la serie de curvas de SEV situadas en esta línea. Se comprueba que el curso de las curvas de SEV, considerado incluso de modo cualitativo, refleja la variación de la profundidad del horizonte de apoyo. El corte pone de manifiesto que sobre la disminución general de la profundidad del horizonte de apoyo de Noroeste a Sureste se marcan dos subidas particulares de la misma, en los puntos de SEV 107, SEV 68 y, sobre todo de modo acusado, en los de SEV 109 y SEV 110.

La simple comparación de las curvas de SEV 146 y SEV 107 superponiéndolas entre sí (fig. 319) evidencia una profundidad menor del horizonte de apoyo en el punto de SEV 107. La comparación de las curvas de SEV 107 y 70 (fig. 322) también indica un levantamiento del horizonte de apoyo en el punto de SEV 107.

Comparando ahora las curvas de SEV 110 y 50 con la de SEV 70 se aprecia el levantamiento del horizonte de apoyo en

Fig. 321.—Plano esquemático del relieve de la superficie del horizonte de apoyo de alta resistividad (por A. V. Mujin, G. A. Gandziuk y otros). Borde meridional de la fosa Dnieper-Donets. 1.—Puntos de SEV y número de los mismos; 2.—Isohipsas de la superficie del horizonte eléctrico de apoyo.



el punto de SEV 110. La comparación entre las curvas de SEV 50, 154 y 84 lleva a la conclusión de que existe un levantamiento gradual de la superficie del horizonte de apoyo desde el punto de SEV 50 en dirección Sureste. Por consiguiente, la comparación cualitativa directa entre las curvas de SEV para cualquier dirección da la posibilidad de juzgar la marcha general de la superficie del horizonte de apoyo en la región estudiada con suficiente claridad.

Hemos considerado sólo una cantidad pequeña de ejemplos de interpretación práctica del material de SEV. Estos ejemplos citados demuestran la gran ayuda que puede ser la exploración eléctrica, ya que se trata de un método de reconocimiento ágil y relativamente económico que da no sólo una idea cualitativa, sino también cuantitativa de la estructura de amplias extensiones. A pesar de que no es posible mediante el método de SEV calcular de modo exacto la profundidad de los horizontes de apoyo, con una utilización adecuada del mismo y meditada y completa interpretación de los resultados, se logra obtener, en la mayoría de los casos, una indicación suficientemente exacta de las variaciones de facies del corte y de los elementos esenciales de la tectónica de las regiones estudiadas.

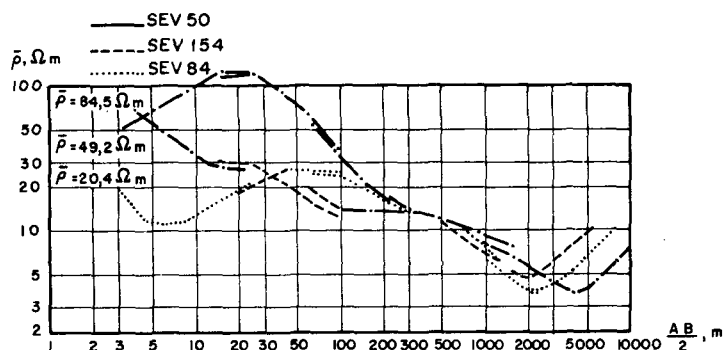
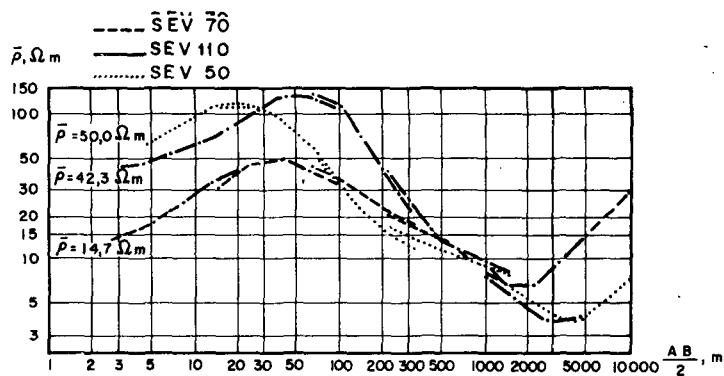
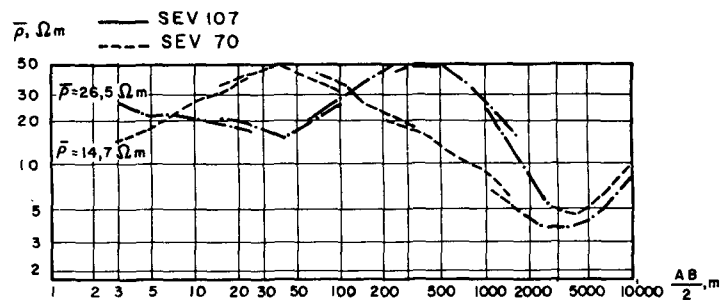


Fig. 322.—Curvas de SEV de la alineación B-B' en la zona del borde meridional de la fosa Dnieper-Donets.

En la región de Kuibyshevo Transvolga, por ejemplo, se han descubierto o estudiado cerca de cien estructuras en cúpula en el Pérmico Superior, muchas de las cuales se han confirmado posteriormente mediante sondeos mecánicos productores de petróleo o gas. También se han obtenido resultados geológicamente valiosos mediante la investigación eléctrica en una serie de zonas de la región petrolífera Volgo-Uralskica, en Ucrania, en Asia Central, en Sajalin y en la región de Ujta-Pechora.

Actualmente se utiliza la exploración eléctrica, dotada de las técnicas más acabadas, en las regiones poco conocidas de Siberia Occidental y Oriental. La misma puede resultar en este caso también de gran ayuda para la prospección de yacimientos petrolíferos y gasíferos. Una evidencia de esto es el resultado obtenido por la exploración eléctrica en, por ejemplo, las fosas de Kansk-Taseevo y Rybinskoe, y depresión de Zeia-Bureinskoe (Siberia Oriental) en las que mediante el estudio combinado de los datos de la exploración gravimétrica y eléctrica se ha logrado presentar esquemas tectónicos de amplias zonas.

Los éxitos de la exploración eléctrica en numerosas regiones de la Unión Soviética, permiten recomendar su utilización intensiva, en las zonas colindantes a las que existen actualmente yacimientos petrolíferos o gasíferos importantes, para trabajos regionales complejos de investigación geológica sobre petróleo y gas.

