

Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera



MINISTERIO
DE FOMENTO

DIRECCIÓN GENERAL
DE CARRETERAS

serie normativas

Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera



2006

GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MUROS DE ESCOLLERA EN OBRAS DE CARRETERA

Las *Recomendaciones para el diseño y construcción de muros de escollera en obras de carreteras*, editadas en 1998, han sido prácticamente la única fuente bibliográfica existente sobre la materia en castellano, contándose a su vez entre las escasas referencias existentes a nivel internacional sobre este tipo de muros.

Desde su publicación se han llevado a cabo en nuestro país importantes realizaciones en este campo, que han ido incluso más allá de los límites tecnológicos inicialmente previstos en dicho documento y que han supuesto una importante vía de conocimiento en este sentido. También ha habido notables innovaciones en el terreno de la normativa europea, relativas fundamentalmente a la caracterización de los materiales pétreos de uso específico en escolleras.

Esta *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera* forma parte de una serie de documentos de divulgación tecnológica elaborados por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, incluidos en una línea editorial que pretende el conocimiento y la armonización de conceptos sobre aspectos relevantes relacionados específicamente con el quehacer de los técnicos del Centro Directivo.

En consecuencia, se ha creído conveniente una nueva redacción de un documento técnico *para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*, con modificaciones significativas que sustituyera por completo y a todos los efectos a las *Recomendaciones para el diseño y construcción de muros de escollera en obras de carreteras*.

El procedimiento desarrollado para la elaboración de esta Guía ha comprendido dos etapas sucesivas:

- La primera tuvo como finalidad la elaboración de un documento que reflejase y pusiese al día la experiencia en la ejecución de este tipo de trabajos en España. Tras la redacción de un primer borrador, se celebró una jornada monográfica con profesionales de la construcción de este tipo de obras, cuyas conclusiones perfeccionaron el documento de partida.
- La segunda ha comprendido:
 - Adaptación a la nueva normativa europea.
 - Revisión del documento por especialistas en geotecnia.
 - Fase de consultas internas.
 - Redacción definitiva, con la consiguiente introducción de nuevos conceptos en diferentes campos, si bien, fundamentalmente relativos a cuestiones de proyecto geotécnico y métodos de cálculo.

La primera fase ha correspondido al equipo redactor de las Recomendaciones de 1998: el Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, encabezado por el catedrático D. Francisco Ballester Muñoz, junto con el profesor D. Daniel Castro Fresno.

La segunda de las fases descritas ha sido llevada a cabo por ingenieros de caminos, canales y puertos, funcionarios de la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras:

D.^a Mercedes Lorena Gómez Álvarez, Servicio de Tecnología de Carreteras.

D. Ángel Juanco García, Servicio de Geotecnia.

D. Álvaro Parrilla Alcaide, Servicio de Geotecnia.

quiénes además han contado con las valiosas opiniones de:

D. Rafael López Guarga, Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón.

D. Fernando Pedraza Majarrez, Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura.

D. Jesús Gómez de Barreda Lavín, Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria.

D. Francisco Ruiz Hidalgo, Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Oriental,

con las significativas aportaciones de los catedráticos y profesores de universidad:

D. Carlos Oteo Mazo.

D. Antonio Soriano Peña.

D. Luis Sopena Mañas.

y de los especialistas en geotecnia de algunas empresas constructoras de ámbito nacional: D. Germán Burbano Juana, D. Jacinto Luis García Santiago, D. José Manuel Gutiérrez Manjón y D. Davor Simic Sureda.

La utilización de esta Guía en el proyecto, construcción y seguimiento de este tipo de obras, permitirá en el futuro matizar y completar los criterios recogidos en la misma, teniendo en cuenta que se trata de un tipo de trabajos en que las nuevas realizaciones se suceden con gran celeridad, a lo largo y ancho de nuestra geografía.

Junio de 2006

1. Consideraciones generales	7
1.1. Introducción	7
1.2. Objeto y campo de aplicación de este documento	9
2. Criterios de proyecto	13
2.1. Consideraciones generales	13
2.2. Cimiento	15
2.3. Cuerpo del muro	15
2.4. Trasdós	16
2.5. Elementos de drenaje	16
2.6. Particularidades de los muros de contención	17
2.7. Particularidades de los muros de sostenimiento	19
3. Bloques de escollera	21
3.1. Características geométricas	21
3.1.1. Granulometría	21
3.1.2. Forma	23
3.1.3. Proporción de superficies trituradas o rotas	23
3.2. Características físicas	24
3.2.1. Densidad de los bloques	24
3.2.2. Resistencia a compresión simple	24
3.2.3. Integridad de los bloques	24
3.2.4. Resistencia a la fragmentación	25
3.3. Características químicas y de durabilidad	25
3.3.1. Estabilidad química	25
3.3.2. Estabilidad frente a la inmersión en agua	26
3.3.3. Estabilidad frente a los ciclos humedad-sequedad	26
3.3.4. Absorción de agua	26
3.3.5. Resistencia a congelación y deshielo	26
3.3.6. Resistencia a la cristalización de sales	28
3.3.7. Efecto Sonnenbrand	29
3.4. Síntesis de características	29
4. Parámetros geomecánicos y métodos de cálculo	33
4.1. Parámetros geomecánicos de la escollera colocada	33
4.1.1. Peso específico	33
4.1.2. Porosidad	34
4.1.3. Ángulo de rozamiento interno	34
4.2. Procedimientos de cálculo	37
4.2.1. Introducción teórica al problema	37
4.2.2. Propuesta de metodología de cálculo	38
4.2.3. Hipótesis de cálculo y coeficientes de seguridad	41
5. Recomendaciones para la ejecución y control de los muros de escollera colocada	43
5.1. Introducción	43
5.2. Cimentación	44
5.3. Cuerpo del muro	46

5.4. Criterios básicos sobre control	49
5.4.1. Introducción	49
5.4.2. Control de los bloques de escollera	50
5.4.3. Control de ejecución	50
5.4.4. Auscultación	51
Apéndice 1. Principales características de la maquinaria y rendimientos para la construcción de muros de escollera	55
A.1.1. Características básicas de la maquinaria	55
A.1.2. Ciclo básico en la colocación de los bloques de escollera	56
A.1.3. Rendimientos más habituales en la construcción de muros de escollera colocada	57
Apéndice 2. Escala de meteorización de las rocas (ISRM)	59
Apéndice 3. Algunos estudios sobre escolleras vertidas y compactadas	61
A.3.1. Estudios sobre la porosidad	61
A.3.1.1. Escolleras vertidas	61
A.3.1.2. Pedraplenes y escolleras compactadas	61
A.3.1.3. Aproximaciones teóricas	62
A.3.2. Estudios sobre el ángulo de rozamiento interno	62
A.3.2.1. Escolleras vertidas	62
A.3.2.2. Escolleras compactadas	63
Apéndice 4. Normas UNE y bibliografía	65
A.4.1. Normas UNE	65
A.4.2. Bibliografía	66

1.1. INTRODUCCIÓN

Las obras de escollera están constituidas por bloques pétreos, obtenidos generalmente mediante voladura, con formas más o menos prismáticas y superficies rugosas.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de escollera, en función del método de puesta en obra.

- Escollera vertida.
- Escollera compactada.
- Escollera colocada.

Sus aplicaciones fundamentales son las que siguen:

- **Escollera vertida:** Dentro del campo de la ingeniería civil se emplea fundamentalmente en obras marítimas y fluviales, y en ciertos casos en presas y otras aplicaciones de tipo medioambiental.

En obras de carretera suele utilizarse en la construcción de mantos drenantes, en la resolución de patologías geotécnicas —deslizamientos, por ejemplo— que requieren peso estabilizador en una determinada zona, como cimiento de terraplenes sobre suelos blandos, etc.

- **Escollera compactada:** De amplio uso en pedraplenes, presas y obras marítimas en general. Se obtienen parámetros geotécnicos, en general mejores que los obtenidos por simple vertido.
- **Escollera colocada:** Se utiliza en encauzamientos y restauraciones fluviales y en determinadas ocasiones en mantos de diques marítimos en talud.

En obras de carretera se emplea como protección contra la erosión de las entradas y salidas de obras de drenaje y de las pilas y estribos de las estructuras de cruce de cauces, así como en contrafuertes drenantes, taludes vistos de pedraplenes de fuerte inclinación y muros de contención o sostenimiento.

Entre las principales ventajas que puede ofrecer la escollera colocada para la construcción de muros se encuentran:

- a) Facilidad de drenaje a través de los intersticios existentes entre los bloques pétreos.
- b) Facilidad para adaptarse a movimientos diferenciales del terreno, admitiendo ciertas distorsiones sin sufrir daños estructurales.
- c) Relativa facilidad de integración de la escollera en el entorno, al tratarse de un material natural.

Los parámetros geotécnicos que resultan con la escollera colocada son, en general, mejores que los obtenidos para el mismo material por simple vertido

Los modelos de comportamiento de los tres tipos de escollera (vertida, compactada y colocada) son diferentes, aunque presentan algunos aspectos comunes. Históricamente los más analiza-

dos son los dos primeros, sobre los que la literatura técnica es relativamente abundante; así, existen numerosos estudios sobre el empleo de la escollera en presas de materiales sueltos, diques rompeolas en talud y pedraplenes. Mucho más escasa resulta, por el contrario, la literatura disponible sobre la escollera colocada y en particular sobre muros.



FIGURA 1.1. PUESTA EN OBRA DE ESCOLLERA EN UNA OBRA MARÍTIMA.



FIGURA 1.2. MURO DE ESCOLLERA EN UN ENCAUZAMIENTO FLUVIAL.

1.2. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE ESTE DOCUMENTO

Esta Guía contempla las principales cuestiones a considerar durante el proyecto y la ejecución de muros de escollera colocada en obras de carretera, en sus principales aplicaciones.

A los efectos de este documento, se entienden por **muros de escollera colocada**, los constituidos por bloques de roca irregulares, de forma poliédrica, sin labrar y de gran tamaño (masa comprendida entre 300 y 3000 kg), que se colocan uno a uno mediante maquinaria específica, con funciones de contención o sostenimiento, siguiendo los principios y recomendaciones formulados en este texto. La sección tipo de los muros de escollera colocada reunirá las características indicadas en el capítulo 2 de esta Guía.

La colocación de cada uno de los bloques se debe llevar a cabo de manera individual, teniendo en cuenta la forma y tamaño de los inmediatamente aledaños, de modo que el conjunto presente el menor volumen de huecos posible, consiguiendo valores altos del peso específico aparente de la escollera colocada y una buena estabilidad del muro.

Se distinguen dos **tipos de muro**, de acuerdo con la misión que se les encomiende:

- a) Muros de contención de laderas y taludes en desmonte (en lo sucesivo, de **contención**).
- b) Muros de sostenimiento de rellenos (en lo sucesivo, de **sostenimiento**).

Los muros de contención y sostenimiento parten de unos planteamientos básicos bien diferenciados pues, mientras que en los de sostenimiento, en general el muro es una parte más de un relleno que se proyecta como obra nueva en su totalidad, en los de contención, el muro tiene como función la estabilización de terrenos, sobre los que únicamente puede actuarse incidiendo en determinados aspectos puntuales.

Se excluyen expresamente del alcance de este documento, la escollera vertida, la compactada y las aplicaciones de la escollera colocada que no supongan su empleo exclusivo como muros en obras de carretera; es decir, no se contemplan diques marítimos, encauzamientos fluviales, etc., aún cuando estos sirvieran como sostenimiento de una carretera.

Tampoco son objeto de este documento los contrafuertes drenantes, pese a su posible función como refuerzo, debido entre otras circunstancias a sus reducidas dimensiones y falta de continuidad sobre el espaldón o talud en desmonte.



FIGURA 1.3. MURO DE CONTENCIÓN DE ESCOLLERA COLOCADA.



FIGURA 1.4. MURO DE SOSTENIMIENTO DE ESCOLLERA COLOCADA.

De igual modo, esta Guía no resulta de aplicación a paramentos de revestimiento sin función estructural, habitualmente conocidos como encachados o pieles de escollera, que fundamentalmente actúan como protección de los taludes ante la meteorización, o persiguen fines estéticos o de integración ambiental. Por lo general, estos revestimientos están constituidos transversalmente por un único bloque y rara vez disponen de un trasdós definido expresamente como tal.

También quedan fuera del ámbito de este documento los muros de bloques paralelepípicos, y por tanto de caras sensiblemente planas (véase figura 1.5), de tamaños y colocación regular, con uno o varios bloques de canto, con o sin presencia de argamasa.



FIGURA 1.5. MURO DE CONTENCIÓN DE BLOQUES PARALELEPIPÉDICOS

Tampoco resultará de aplicación lo indicado en este texto cuando se trate de muros de *escollera hormigonada*, entendiendo por tales aquéllos en los que el hormigón impida el comportamiento de los bloques del cuerpo del muro¹ como elementos independientes, simplemente yuxtapuestos y gobernados por parámetros de fricción.

Por último no deberá aplicarse este documento cuando se trate de casos que, aún no habiéndose definido expresamente en la relación precedente, no se correspondan con los planteamientos que se exponen en el mismo, o no cumplan alguno de los criterios básicos referidos en el capítulo 2.

¹ En esta Guía se recomienda con carácter general, únicamente el hormigonado del cimientó (véase apartado 2.2). A título meramente orientativo y como orden de magnitud, suele hablarse de escollera hormigonada cuando el volumen de hormigón supera un diez o quince por ciento (10-15%) del ocupado por el cuerpo del muro.

2.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para el proyecto de los muros de escollera colocada se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- La geometría de la sección tipo del muro debe cumplir las condiciones que se detallan en las figuras 2.1 y 2.2 y que se describen en los epígrafes que siguen.
- Los bloques de escollera deben reunir las características que se indican en el capítulo 3.
- El cálculo se puede efectuar siguiendo las recomendaciones que se formulan en el capítulo 4, o bien mediante los criterios que justifique el proyectista.
- Las prescripciones para la ejecución y el control se deben establecer de acuerdo con las recomendaciones del capítulo 5.

Se deberán seguir además, con carácter general, las recomendaciones establecidas en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

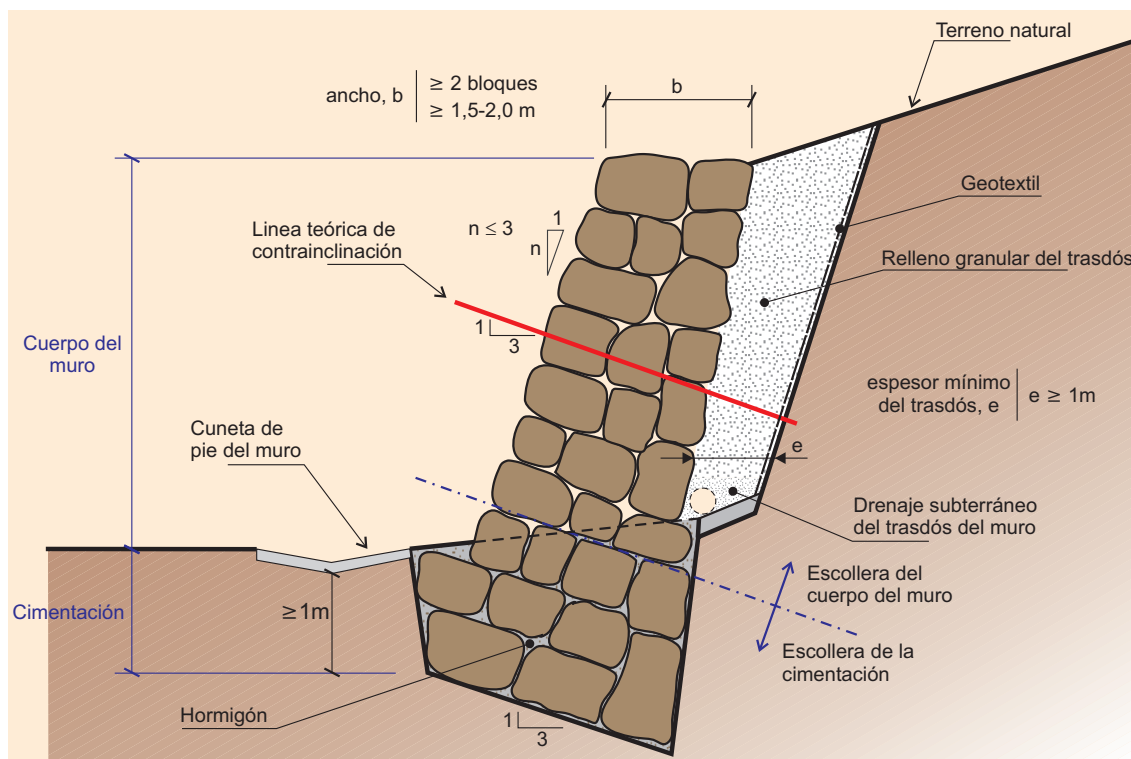


FIGURA 2.1. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TIPO DE UN MURO DE ESCOLLERA COLOCADA CON FUNCIÓN DE CONTENCIÓN.

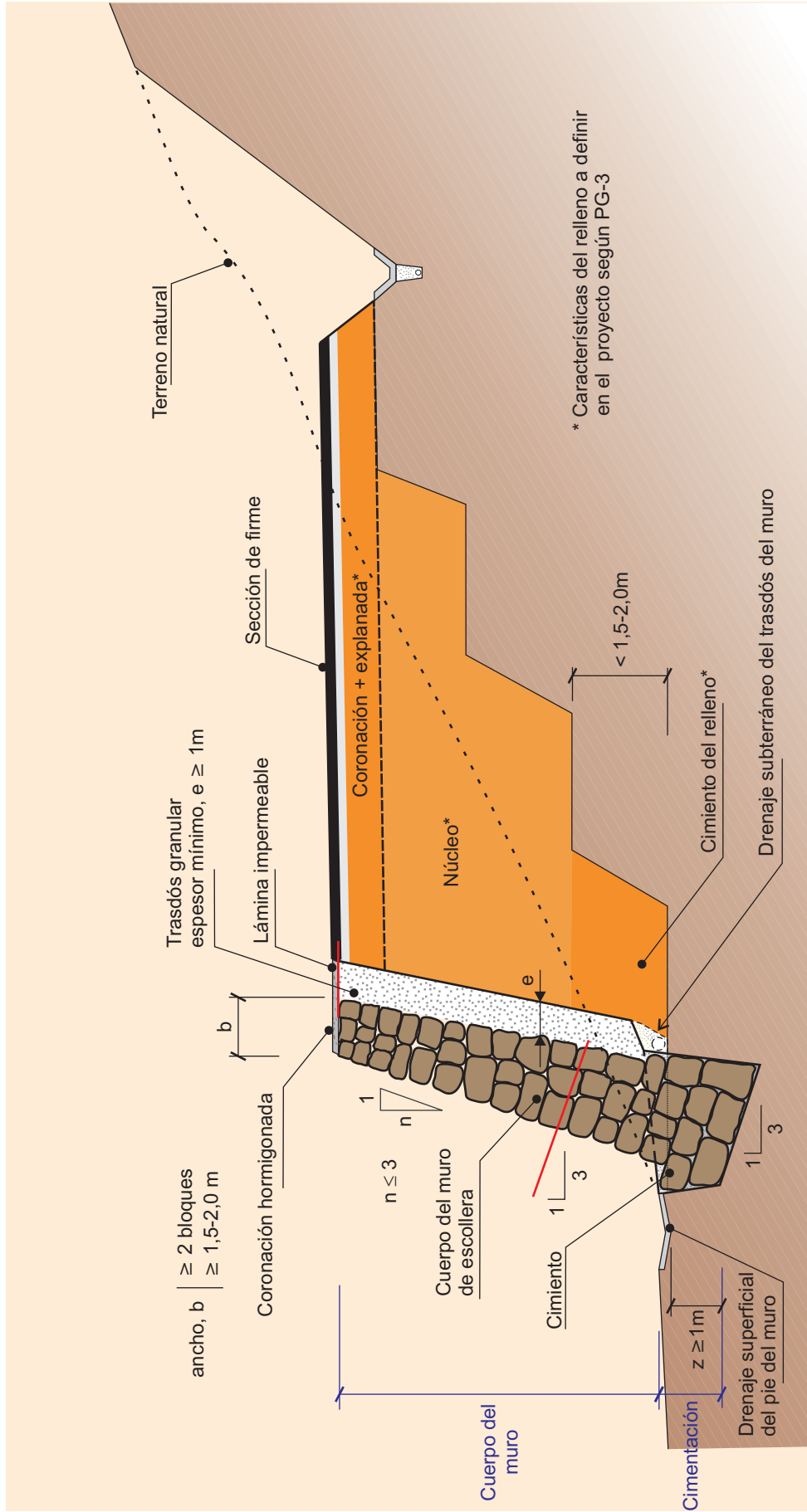


FIGURA 2.2.DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA SECCIÓN TIPO DE UN MURO DE ESCOLLERA COLOCADA CON FUNCIÓN DE SOSTENIMIENTO.

En los epígrafes que se incluyen a continuación se indican los principales aspectos a considerar en el proyecto de los elementos que componen la **sección tipo** del muro de escollera que, en el caso más general, serán:

- Cimiento.
- Cuerpo del muro.
- Trasdós.
- Elementos de drenaje.

2.2. CIMIENTO

El proyecto definirá la cota de cimentación de acuerdo con los criterios especificados en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, siendo recomendable en todo caso, una profundidad mínima¹ de un metro (1 m). El fondo de excavación de la cimentación se ejecutará normalmente con una contrainclinación² respecto a la horizontal de valor aproximado 3H:1V.

En general, la escollera del cimiento se debe hormigonar, pudiendo en ocasiones utilizarse rebo pético con material de las mismas características que la escollera. El hormigonado³ del cimiento del muro de escollera es necesario para poder considerar que trabaja como un elemento rígido.

El proyecto deberá definir el tipo de hormigón⁴ a emplear en el relleno del cimiento, si bien, a priori se recomienda con carácter general hormigón en masa de veinte megapascales de resistencia característica, consistencia blanda y tamaño máximo del árido⁵ de cuarenta milímetros, HM-20/B/40/A, siendo A la designación del ambiente.

Además el proyecto definirá la cota a alcanzar con el hormigón y las pendientes a dar a su superficie para evitar acumulaciones de agua, enrasando normalmente con los bordes de la excavación o los elementos de drenaje en su caso.

2.3. CUERPO DEL MURO

La superficie de apoyo de la primera hilada de escollera sobre la cara superior del cimiento de escollera hormigonada, debe tener una inclinación media hacia el trasdós en torno al 3H:1V (véase figura 5.3) y presentar una superficie final dentada e irregular, que garantice la trabazón entre el cuerpo del muro y la cimentación.

Las hiladas del cuerpo del muro mantendrán la inclinación media de 3H:1V hacia el trasdós del muro. El paramento visto (intradós) no deberá ser más vertical que 1H:3V.

La anchura del muro, que se determinará en el cálculo, podrá ser variable con la altura y deberá:

- Permitir que en cada hilada se puedan colocar al menos dos (2) bloques de escollera.
- Presentar un valor mínimo de unos dos metros (2 m), que el proyecto podría rebajar justificadamente hasta un metro y cincuenta centímetros (1,50 m) en el caso de muros de menos de cinco metros (5 m) de altura.

¹ En caso de que exista cuneta por el intradós, la profundidad de cimentación se medirá a partir de su vértice (véanse figuras 2.1 y 2.2).

² Aunque a efectos de cálculo pueda no ser estrictamente necesario, resulta recomendable que el fondo de la excavación presente una contrainclinación del 3H:1V, para que los bloques del cimiento se vayan colocando paralelamente a las hiladas del muro. En este sentido el proyecto podrá justificar una inclinación diferente.

³ En muros de pequeña altura —normalmente inferior a tres o cuatro metros (3 ó 4 m)— cimentados en roca de buena calidad en la que no afloren aguas, el proyecto podría justificar el empleo de cimientos de escollera sin relleno de hormigón, siempre que se disponga una capa de hormigón de nivelación y limpieza, y se garantice el drenaje.

⁴ Véase: EHE. Apartado 39.2.

⁵ El proyecto podrá justificar el empleo de hormigón con tamaño máximo del árido de veinte milímetros (20 mm), en función de las características de los huecos a rellenar entre bloques.

2.4. TRASDÓS

Las características del trasdós del muro tienen una influencia decisiva en el comportamiento del mismo y de ellas depende, en buena medida, su estabilidad.

En general, se deberá disponer un relleno de material granular en el trasdós del muro, con un espesor mínimo de un metro ($e \geq 1$ m), si bien en casos excepcionales de muros de contención, el proyecto puede justificar un espesor menor, o incluso prescindir del mismo (véase apartado 2.6).

Con este relleno de material granular se pretenden las siguientes funciones:

- Materializar una transición granulométrica entre el terreno natural o relleno y el cuerpo del muro.
- Repartir, de modo relativamente uniforme, los empujes sobre el cuerpo del muro de escollera. En general deberán buscarse valores altos del ángulo de rozamiento interno del relleno de trasdós y buenas características drenantes para el mismo.
- Interponer una capa granular con buenas características drenantes entre el terreno natural o relleno y el muro.
- Dificultar la salida de material del terreno natural o relleno, a través de los huecos entre bloques de escollera.

El proyecto deberá definir la geometría del trasdós, las características de los materiales y el resto de prescripciones necesarias para su ejecución.

Entre las diversas granulometrías empleadas en su caso en la construcción del trasdós, o entre éstas y el terreno natural, se podrán disponer, en general, geotextiles con función de separación o de filtro.

2.5. ELEMENTOS DE DRENAJE

El proyecto debe definir en cada caso los elementos de drenaje necesarios distinguiendo entre el drenaje superficial y el subterráneo. El primero se debe definir de acuerdo con lo especificado en la norma 5.2-IC y el segundo siguiendo las recomendaciones de la OC 17/2003, o aquellas que las sustituyan.

En lo referente al **drenaje superficial**, se proyectarán las medidas oportunas para evitar que el agua de escorrentía desagüe al relleno granular del trasdós o al propio muro de escollera. Para ello se dispondrán cunetas de coronación o de pie de talud (preferiblemente revestidas), bordillos u otros dispositivos que conduzcan el agua hasta lugares apropiados.

No deberán disponerse bajantes u otros elementos sobre los muros de escollera, salvo que se proyecten medidas especiales que avalen su buen comportamiento, aún cuando en el paramento de escollera se produjeran movimientos decimétricos.

En lo referente al **drenaje subterráneo** debe evitarse la acumulación de aguas en el trasdós y el cimientado del muro; el proyecto debe definir las cotas y pendientes finales de hormigonado del cimientado para impedir la acumulación del agua en los mismos, garantizando su salida.

Cuando sean de prever afloramientos de agua en los fondos y taludes de las explanaciones, deberán adoptarse las correspondientes medidas de drenaje de estabilización, en coordinación con el proyecto del trasdós (disposición de capas granulares, geocompuestos drenantes, etc.).

Cuando se proyecten drenes californianos en el trasdós, será precisa la disposición de tubos de acero pasantes a través de la escollera.

En general no se permitirá el paso de canalizaciones para servicios a través del muro o su trasdós. Únicamente en casos excepcionales, debidamente justificados, podrían llevarse a cabo este tipo de trabajos, debiendo estar a lo especificado al respecto en la OC 17/2003 y teniendo en cuenta además las posibilidades de movimiento relativo de los bloques de escollera, en lo tocante al cálculo mecánico de las referidas conducciones.

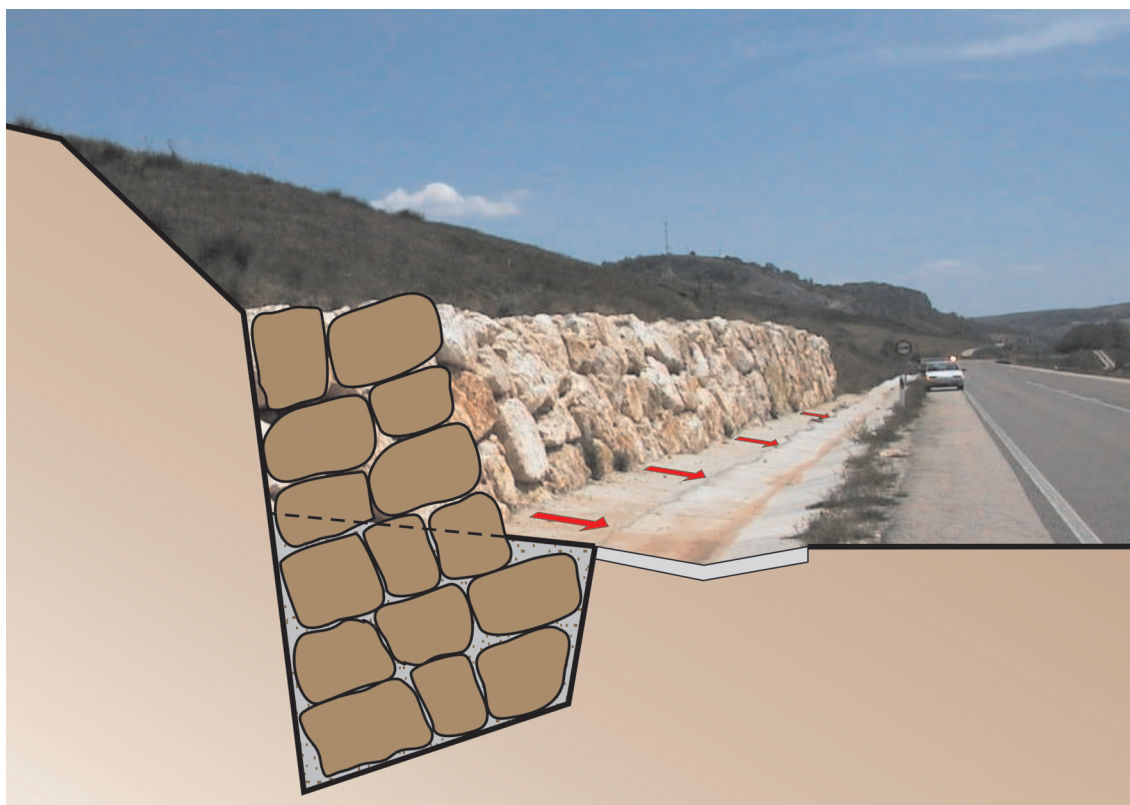


FIGURA 2.3. HORMIGÓN DE CIMENTACIÓN DE UN MURO DE ESCOLLERA CON PENDIENTE VERTIENTE HACIA LA CUNETA DE PIE.

2.6. PARTICULARIDADES DE LOS MUROS DE CONTENCIÓN

El principal condicionante que suelen presentar los muros de contención es que se deben ejecutar sobre una ladera natural o talud en desmonte, en la que únicamente se podrán emprender determinadas actuaciones puntuales.

Con frecuencia el motivo de la ejecución del muro es que dichas laderas o taludes presentan problemas de estabilidad⁶, pretendiéndose con el mismo, bien de forma aislada o conjuntamente con otras actuaciones, proporcionar un nivel de contención adecuado respecto de la carretera.

Si bien el estudio de la estabilidad de los taludes o laderas, con o sin la presencia del muro, excede el contenido de este documento, se indica que el proyecto debe basarse en un exhaustivo reconocimiento de la ladera natural, con particular incidencia en las cuestiones relativas a su naturaleza geológica y comportamiento geotécnico e hidrogeológico, que resultan de gran importancia a la hora de evaluar la estabilidad del conjunto.

Con carácter general se dispondrá un trasdós granular conforme a lo especificado en el apartado 2.4, como materialización de la transición granulométrica entre terreno natural y paramento de escollera.

No se emplearán para el trasdós granular materiales procedentes de rocas que no sean estables, según se especifica en los artículos 331 y 333 del PG-3. El material estará limpio y exento de materiales extraños y cumplirá las limitaciones que se indican en la tabla 2.1.

⁶ También puede emplearse cuando el problema sea fundamentalmente la meteorización de la ladera o talud sin que ello implique problemas de estabilidad en la misma, si bien en tales circunstancias, resulta más habitual el proyecto de encachados o pieles de escollera: paramentos sin función estructural que no constituyen el objeto de este documento (véase apartado 1.2).

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE TRASDÓS, EN MUROS DE CONTENCIÓN

PROPIEDAD	NORMA	VALOR
Tamaño máximo	UNE 103101	$D_{\text{máx}} \leq 100 \text{ mm}$
Cernido por tamiz 0,080 UNE	UNE 103101	# 0,080 mm < 5%
Coefficiente de uniformidad*	—	$2 \leq C_u \leq 10$
Plasticidad	UNE 103103	LL < 30
	UNE 103104	IP < 10
Contenido de materia orgánica	UNE 103204	MO $\leq 0,2\%$
Contenido de sales solubles incluido el yeso	UNE 103205	SS $\leq 0,2\%$

* **Coefficiente de uniformidad:** Relación de diámetros de partículas, o aberturas de tamices, por los que pasa el sesenta y el diez por ciento (60 y 10%) de la muestra, en peso ($C_u = D_{60}/D_{10}$).

Pueden darse casos en que los condicionantes geométricos del emplazamiento no permitan la disposición de espacio suficiente para la ejecución del trasdós de material granular con el espesor mínimo indicado en el apartado 2.4. En tales circunstancias y previa justificación expresa del proyecto, se podrá considerar la reducción del espesor del material granular.

Puede incluso darse el caso de que no sea posible la disposición de material granular en el trasdós por problemas de espacio u otros, que deberán justificarse de modo expreso en el proyecto. En dichas circunstancias deberán interponerse geotextiles con funciones de separación y filtro, tomando en consideración para su elección, el riesgo de que se produzcan fenómenos de colmatación y punzonamiento en los mismos. Con ello se pretende que al menos se evite la migración hacia la escollera de materiales del terreno natural, no siendo posible garantizar el resto de funciones atribuidas genéricamente al trasdós.



FIGURA 2.4. MURO DE CONTENCIÓN PARA CORRECCIÓN DE UN MOVIMIENTO DE LADERA.

2.7. PARTICULARIDADES DE LOS MUROS DE SOSTENIMIENTO

En los muros de sostenimiento de escollera colocada, ésta puede considerarse como una parte de un relleno que se diseña como obra nueva en su totalidad.

Puesto que el proyecto debe incluir tanto la definición del muro de escollera como la del relleno, hay un abanico muy amplio de soluciones para el diseño de la sección tipo conjunta, debiendo analizarse la configuración geométrica y zonificación del relleno que mejor se adapte a cada caso concreto, teniendo en cuenta las siguientes pautas básicas:

- Para estudiar y establecer las **condiciones de apoyo** del relleno, debe partirse de un adecuado reconocimiento, acondicionamiento y captación de las aguas del terreno natural.

Se seguirá lo establecido en los artículos 330 a 333 del PG-3, en los apartados relativos a la preparación de la superficie de asiento, así como los criterios generales establecidos al respecto en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

En el caso de que hubiera presencia de agua en las laderas naturales sobre las que se cimenta el relleno, se deberán seguir las indicaciones de la OC 17/2003 en lo tocante a la interceptación de flujos de agua, si bien este aspecto corresponde al proyecto del relleno, propiamente dicho.

- Deben establecerse **transiciones granulométricas** entre el muro de escollera y las distintas zonas que componen el relleno, que cumplan con las características enunciadas a este respecto en los artículos 330 a 333 del PG-3, según el tipo que corresponda. No será admisible la eliminación del relleno de material granular del trasdós especificado en el apartado 2.4 de este documento, ni su reducción de espesor respecto del mínimo allí establecido.
- Se estudiarán los detalles constructivos de la **coronación** del muro junto con el drenaje superficial de la carretera y se dispondrán medidas que impidan, en todo caso, el vertido o desagüe de la escorrentía superficial al relleno granular del trasdós o al propio muro de escollera.



FIGURA 2.5. EJEMPLO DE MURO DE SOSTENIMIENTO.

En particular cuando la coronación del muro se encuentre a la misma cota que el pavimento, puede resultar conveniente:

- Proceder al hormigonado de la coronación.
- Eliminar zonas sin revestir en las márgenes de la calzada.
- Proceder al revestimiento de las cunetas.
- Contemplar la posibilidad de disponer una lámina impermeabilizante bajo la coronación hormigonada, bajo el contacto de ésta con el pavimento, o incluso bajo la cuneta revestida.
- El proyecto de posibles bajantes estará a lo especificado en el apartado 2.5.

El elemento principal que interviene en la ejecución de la tipología de muro contemplada en este documento es el bloque de escollera, unidad básica a partir de la cual, por agregación, se construye el muro.

Es por ello que las propiedades de los bloques tienen una especial incidencia en el comportamiento de la obra.

Los bloques de escollera deben provenir de macizos rocosos sanos¹, de canteras, de préstamos, o de las excavaciones de la propia obra y se obtendrán mediante voladuras².

En este capítulo se establecen las propiedades más relevantes que deberán reunir los bloques para su empleo en muros de escollera colocada, que se han clasificado atendiendo a los siguientes tipos de características:

- Geométricas.
- Físicas.
- Químicas y de durabilidad.

Para muchas de estas propiedades se toma como referencia la norma UNE EN 13383 *Escolleras*.

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

3.1.1. GRANULOMETRÍA

En la norma UNE EN 13383-1 se definen tres tipos de granulometría³ para la escollera:

- Escollera gruesa.
- Escollera media.
- Escollera fina.

Dado el tamaño de los bloques de las escolleras media y gruesa, su granulometría se establece por distribución de masas, según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13383-2.

¹ De acuerdo con los criterios de clasificación de rocas de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas se recomienda que, con carácter general el grado de meteorización del macizo sea el correspondiente a las categorías de roca sana o fresca, o bien ligeramente meteorizada, es decir: grado ISRM \leq II.

² Excepcionalmente podrán utilizarse bloques pétreos obtenidos de las excavaciones de la propia obra que aparezcan de forma natural, fundamentalmente en coluviones, siempre que cumplan las características especificadas en este capítulo.

³ Se puede distinguir entre:

Granulometría gruesa (escollera fina): Designación de granulometría con un límite nominal superior definido por un tamaño de tamiz entre 125 mm y 250 mm, ambos inclusive.

Granulometría ligera (escollera media): Designación de granulometría con un límite nominal superior definido por una masa entre 80 kg y 500 kg, ambos inclusive.

Granulometría pesada (escollera gruesa): Designación de granulometría con un límite nominal inferior definido por una masa de más de 500 kg.

Fragmento: Trozo de escollera en la fracción más fina de granulometrías gruesas o la fracción más ligera de granulometrías ligeras y pesadas para las cuales se aplican los requisitos de distribución de tamaño o de masas.

Las principales aplicaciones de estas granulometrías en obras de carretera son:

- Escollera **gruesa HMB_{1000/3000}**, con masa comprendida entre mil y tres mil kilogramos (1000/3000):
 - Muros de escollera colocada, con función de contención o sostenimiento.
- Escollera **gruesa HMB_{300/1000}**, con masa comprendida entre trescientos y mil kilogramos (300/1000):
 - Muros de escollera colocada de escasa altura o sometidos a pequeños empujes, normalmente de contención en desmontes de poca altura.
 - Material para relleno de huecos en los muros de escollera colocada del huso inmediatamente superior (es decir, el 1000/3000).
 - Encachados, protecciones, elementos de disipación, mantos drenantes y otras aplicaciones en obras de drenaje de la carretera (no constituyen el objeto de este documento).
 - Empleo como peso estabilizador, sin función estructural, en aplicaciones diversas (no constituye el objeto de este documento).
- Escolleras **media y fina**:
 - Empleo para la construcción de rellenos compactados (no constituyen el objeto de este documento).
 - Ciertos tamaños podrían emplearse como relleno de huecos de la granulometría inmediatamente superior.

TABLA 3.1. GRANULOMETRÍAS PROPUESTAS

CATEGORÍA(*)	HMB _{300/1000}	HMB _{1000/3000}
GRANULOMETRÍA (kg)	300 a 1000	1000 a 3000
MASA (kg)	PORCENTAJE (EN MASA) DE PARTÍCULAS CON MASA MENOR DE	
4500	—	97-100%
3000	—	70-100%
1500	97-100%	—
1000	70-100%	0-10%
650	—	0-5%
300	0-10%	—
200	0-5%(**)	—

(*) Conforme a UNE EN 13383-1.

(**) Únicamente fragmentos.

La obtención en obra de husos granulométricos como los referidos no resulta sencillo, apuntándose como principales posibilidades:

- Ajuste iterativo de la retícula que define la voladura en cantera. Debe tenerse en cuenta que no podrá reducirse por debajo de un cierto valor, en función de las características de fracturación del macizo rocoso.

- Taqueo, o fragmentación de grandes bloques mediante empleo de explosivos.
- Obtención de bloques por medios mecánicos.

En la práctica suele resultar habitual la obtención de tamaños propios de los tres tipos genéricos de granulometría, que deben separarse y acopiarse convenientemente para su empleo en las aplicaciones a que se ha hecho referencia.

De las granulometrías pesadas definidas en UNE EN 13383-1, las más adecuadas para su empleo en muros de escollera colocada, son las que se indican en la tabla 3.1, si bien el proyecto podrá justificar el empleo de granulometrías diferentes.

3.1.2. FORMA

La forma más adecuada de los bloques para su aplicación como escollera colocada en muros para obras de carretera, es la aproximadamente prismática. No resulta conveniente en general, el empleo de bloques planos o aciculares, ni piramidales. Tampoco resultan adecuadas las formas redondeadas con baja proporción de superficies trituradas o rotas, aspecto que se aborda en 3.1.3.

Para valorar la adecuación de la forma de los bloques se usa el criterio de determinación del porcentaje de piezas de escollera cuya relación entre longitud y espesor sea superior a tres, siguiendo el método definido en UNE EN 13383-2.

Salvo especificación en contra del proyecto, el número de bloques que superen dicha relación deberá ser inferior o igual al quince por ciento:

$$\left(\frac{L}{E} > 3\right) \leq 15\%$$

donde:

L: Longitud: Dimensión máxima de un bloque de escollera según se define por la mayor distancia de separación de dos planos paralelos tangentes a la superficie de la piedra.

E: Espesor: Dimensión mínima de un elemento de escollera según se define por la menor distancia de separación de dos planos paralelos tangentes a la superficie de la piedra.

3.1.3. PROPORCIÓN DE SUPERFICIES TRITURADAS O ROTAS

Los bloques de escollera deben presentar superficies rugosas y el mayor número posible de caras de fractura y aristas vivas, debiendo evitarse los bloques redondeados.

A los efectos de este documento, se consideran como bloques redondeados aquellos que presenten menos del cincuenta por ciento (50%) de caras trituradas o rotas. La proporción de piezas de escollera redondeadas, se determinará según UNE EN 13383-1. Salvo especificación en contra del proyecto (que deberá basarse en un estudio especial que garantice un comportamiento adecuado), la proporción de bloques redondeados, deberá ser inferior o igual al cinco por ciento.

$$RO \leq 5\%$$

donde:

RO: Proporción de superficies trituradas o rotas.

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

3.2.1. DENSIDAD DE LOS BLOQUES

Se deberá obtener la densidad de los bloques siguiendo los criterios especificados en la norma UNE EN 13383-1, con el procedimiento de ensayo referido en UNE EN 13383-2.

Se recomienda que la densidad seca de los bloques sea superior o igual a dos mil quinientos kilogramos por metro cúbico ($\rho_d \geq 2500 \text{ kg/m}^3$).

3.2.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a compresión simple se determinará según la norma⁴ UNE EN 1926.

Se deben ensayar series de diez (10) probetas y comprobar que, en cada serie se cumplen los siguientes valores mínimos:

- La resistencia media a compresión de la serie, tras desprejar el valor mínimo de la misma, debe ser mayor o igual que ochenta megapascals ($\geq 80 \text{ MPa}$).
- Al menos ocho de las diez (8/10) probetas deben presentar una resistencia mayor o igual que sesenta megapascals ($\geq 60 \text{ MPa}$).

El proyecto podrá justificar el empleo de valores menores, que no deberán rebajar los recién referidos en más de veinte megapascals (20 MPa), con lo que estos podrían llegar a establecerse, si así se justificara convenientemente, en sesenta y cuarenta megapascals (60, 40 MPa) respectivamente.

3.2.3. INTEGRIDAD DE LOS BLOQUES

A los efectos de este documento se entiende por integridad del bloque, la propiedad de cada pieza de escollera que indica su capacidad para continuar siendo un único bloque, después de someterlo a las operaciones de manipulación, transporte y puesta en obra, así como a las correspondientes sollicitaciones durante su vida útil.

Se excluyen de esta definición los **fragmentos**, entendiendo como tales aquellos trozos más ligeros que el límite nominal inferior de los requisitos de distribución de tamaños o masas, que definen la granulometría adoptada.

La integridad de los bloques es una propiedad de difícil evaluación práctica, que está ligada, bien a la presencia de juntas, fisuras, discontinuidades, etc., en el macizo rocoso de procedencia, o a la inducción de fisuras debida al método de extracción de los bloques, principalmente mediante voladuras.

Los métodos prácticos de evaluación de la integridad de los bloques se encuentran aún a nivel incipiente, habiéndose desarrollado principalmente para escolleras en obras marítimas⁵, pudiendo citarse:

- **Inspección visual**, procedimiento subjetivo, que además no permite la detección de fisuras internas.
- **Ensayos destructivos**, entre los que destaca el de *rotura por caída* en que se somete un número determinado de bloques a un impacto normalizado, al dejarlos caer desde una altura fija sobre un suelo suficientemente rígido y uniforme, determinándose el *índice de rotura* a través de las pérdidas de masa.
- **Ensayos no destructivos**, basados fundamentalmente en la medición de la velocidad de propagación de las ondas, por lo general acústicas, a través de un número determinado

⁴ Véase: UNE EN 1926: 1999. Anexo A.

⁵ Véase: UNE EN 13383-1. Anexo B.

de bloques. La comparación entre la velocidad realmente medida y la teórica para cada tipo de roca, proporciona una estimación de la existencia de microgrietas, planos de discontinuidad, etc., que deberá ser tanto más importante, cuanto mayor sea la diferencia relativa entre ambas magnitudes.

En muros de escollera colocada los problemas debidos a falta de integridad de los bloques se pueden manifestar por rotura de los mismos en cantera, durante su transporte y manipulación o una vez colocados (véase figura 3.1). Cuando se aprecien signos que pudieran indicar la existencia de este problema deberá incidirse en el mismo, estableciendo un criterio de rechazo adecuado a cada caso concreto. Los requisitos de integridad deben ser más exigentes conforme aumentan las sollicitaciones, fundamentalmente con la altura del muro.



FIGURA 3.1. BLOQUE ROTO CON POSTERIORIDAD A SU PUESTA EN OBRA.

3.2.4. RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN

La resistencia a la fragmentación se valorará mediante el coeficiente Los Ángeles obtenido según UNE EN 1097-2. Dicho coeficiente deberá ser menor o igual que treinta y cinco ($LA \leq 35$).

Las muestras se prepararán machacando al menos seis (6) piezas separadas de escollera, cuyas masas no difieran entre sí más del veinticinco por ciento (25%). El machaqueo debe realizarse preferiblemente con una machacadora de mandíbulas, de laboratorio.

3.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y DE DURABILIDAD

3.3.1. ESTABILIDAD QUÍMICA

Las rocas a emplear tendrán una composición mineralógica estable químicamente y no darán lugar con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras, obras de fábrica, etc., o contaminar el suelo o corrientes de agua.

Si se considera conveniente, para caracterizar los componentes que puedan ser lixiviados y causar dichos daños, se empleará la norma UNE EN 1744-3.

3.3.2. ESTABILIDAD FRENTE A LA INMERSIÓN EN AGUA

Se deberán emplear rocas estables frente a la inmersión en agua, entendiéndose por tales aquellas que sumergidas en agua durante veinticuatro horas (24 h) no manifiesten fisuración alguna y la pérdida de masa que sufran sea menor o igual al dos por ciento ($\Delta m/m \leq 0,02$), según UNE 146510.

3.3.3. ESTABILIDAD FRENTE A LOS CICLOS HUMEDAD-SEQUEDAD

Para tener en cuenta el posible efecto frente a los cambios de humedad, pueden utilizarse ensayos de ciclos de humedad-sequedad, según UNE 146511, para calificar la estabilidad de la roca, exigiéndose una pérdida de masa menor o igual al dos por ciento ($\Delta m/m \leq 0,02$). Estos ensayos deberán realizarse al menos, cuando la escollera se encuentre en una zona inundable.

3.3.4. ABSORCIÓN DE AGUA

Normalmente una fracción de los poros de una roca se satura al sumergirla; en este sentido, la absorción de agua de una roca es un parámetro bastante significativo en relación con su alterabilidad potencial. Asimismo, por estar ligada a la porosidad, suele tener reflejo en los valores de la resistencia a compresión simple, que pueden disminuir significativamente en rocas saturadas.

A los efectos de este documento y en relación con los bloques para la construcción de muros de escollera, se recomienda que la absorción de agua determinada sobre diez (10) de dichos bloques, conforme a lo especificado en UNE EN 13383-2, sea menor o igual al dos por ciento⁶ ($w_{as} \leq 2\%$).

Si la absorción fuera menor o igual al cinco por ciento ($w_{as} \leq 0,5\%$), la muestra puede considerarse, directamente, como resistente a la congelación y deshielo, y a la cristalización de sales.

3.3.5. RESISTENCIA A CONGELACIÓN Y DESHIELO

El efecto de las heladas sobre las rocas es consecuencia del aumento de volumen que experimenta el agua contenida en sus poros al congelarse. La importancia de los daños causados por los ciclos hielo-deshielo depende principalmente del régimen de temperaturas y humedad, de la porosidad y grado de saturación de la escollera, de su naturaleza mineralógica y de su estado de alteración.

La resistencia de la escollera a la congelación y deshielo se puede evaluar en laboratorio mediante ensayos en los que se somete a ciclos de hielo-deshielo. El pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto debe determinar si resulta relevante o no la realización de estos ensayos, en función de las características concretas de la obra. En este sentido, pueden tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- Si los bloques de escollera presentan una absorción de agua menor o igual que el cinco por ciento ($w_{as} \leq 0,5\%$), la muestra puede considerarse resistente al hielo-deshielo.
- Solamente se considera necesario determinar la resistencia a congelación y deshielo en zonas con heladas.

En ausencia de un criterio más específico en este sentido, se recomienda adoptar el de la descripción de la subclase específica de exposición H, establecido en la EHE⁷, que resulta de aplicación a:

«elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.»

⁶ Según UNE EN 13383-1, anexo C, ciertas rocas como las areniscas jurásicas y carboníferas, calizas jurásicas y pérmicas y dolomías pérmicas, suelen tener valores de absorción superiores al dos por ciento ($w_{as} > 2\%$) y sin embargo pueden presentar un comportamiento adecuado.

⁷ Véase: EHE. Apartado 8.2.3 y tabla 8.2.3.a.

A falta de un estudio climático más detallado, se puede aplicar el comentario al apartado 8.2.2 de dicha norma:

«...»

El criterio térmico-probabilístico fijado en el Artulado para la definición de la subclase específica de exposición H, de heladas sin sales fundentes, consistente en que exista una probabilidad superior al 50% de que se alcance la temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al menos una vez al año, puede suponerse, a los efectos de aplicar esta Instrucción, equivalente a que la temperatura media anual sea inferior a $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

...»

Las zonas a que se hace referencia, pueden obtenerse de los mapas que se incluyen como figuras⁸ 3.2 y 3.3 respectivamente.

Cuando, de acuerdo con lo especificado en los párrafos anteriores, se considere conveniente someter a los bloques al ensayo de determinación de resistencia a congelación y deshielo, éste se efectuará según lo indicado en UNE EN 13383-2.

Resulta recomendable que la pérdida de masa experimentada por la muestra después de someterse a dicho ensayo, resulte inferior o igual al seis por ciento ($F \leq 6\%$), si bien el proyecto podría justificar la posibilidad de aceptar pérdidas ligeramente superiores que, en ningún caso habrían de encontrarse por encima del diez por ciento ($F \leq 10\%$).

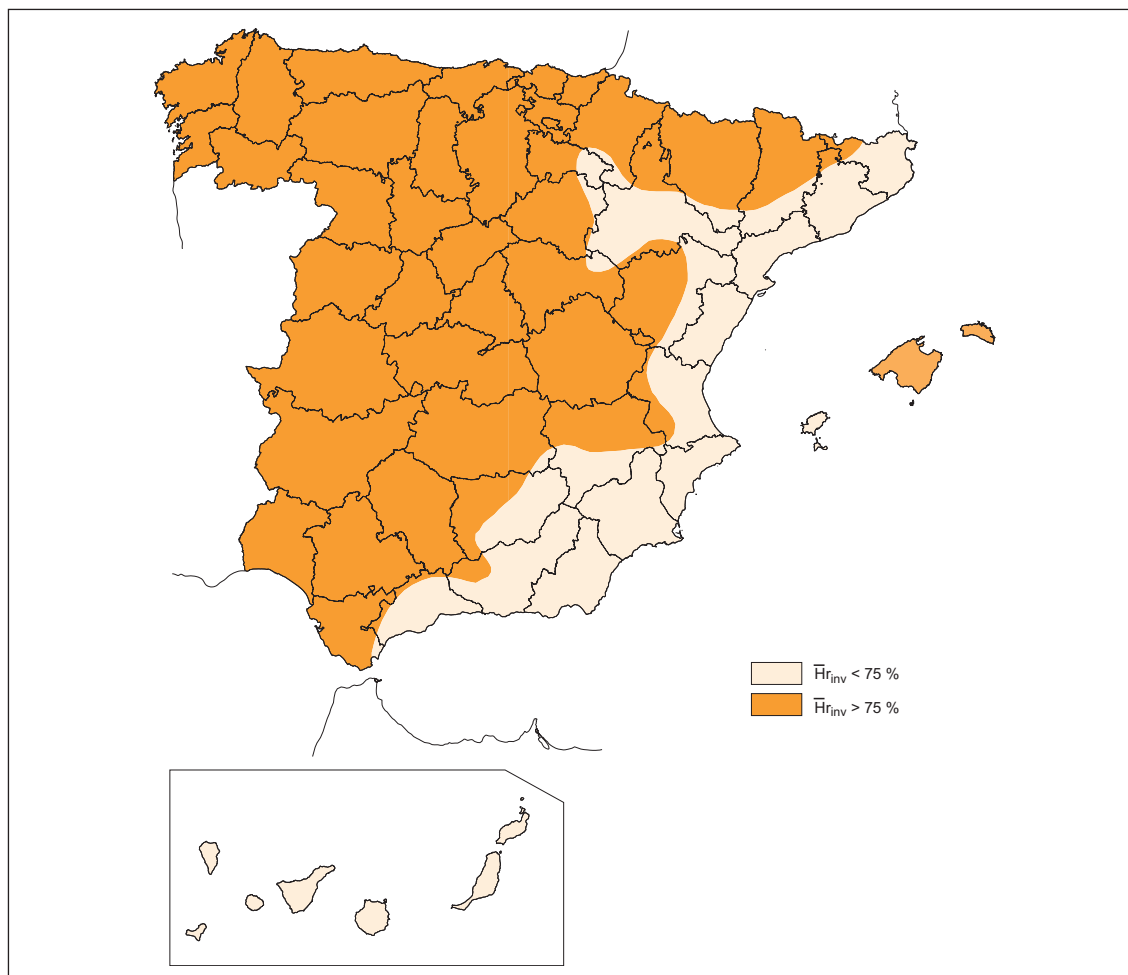


FIGURA 3.2. HUMEDAD RELATIVA MEDIA DEL AIRE EN INVIERNO.

⁸ La figura 3.2 se ha simplificado eliminando, de la obtenida directamente del *Atlas Nacional de España*, algunos enclaves con valores de la humedad relativa media en invierno, muy próximos al límite de referencia.

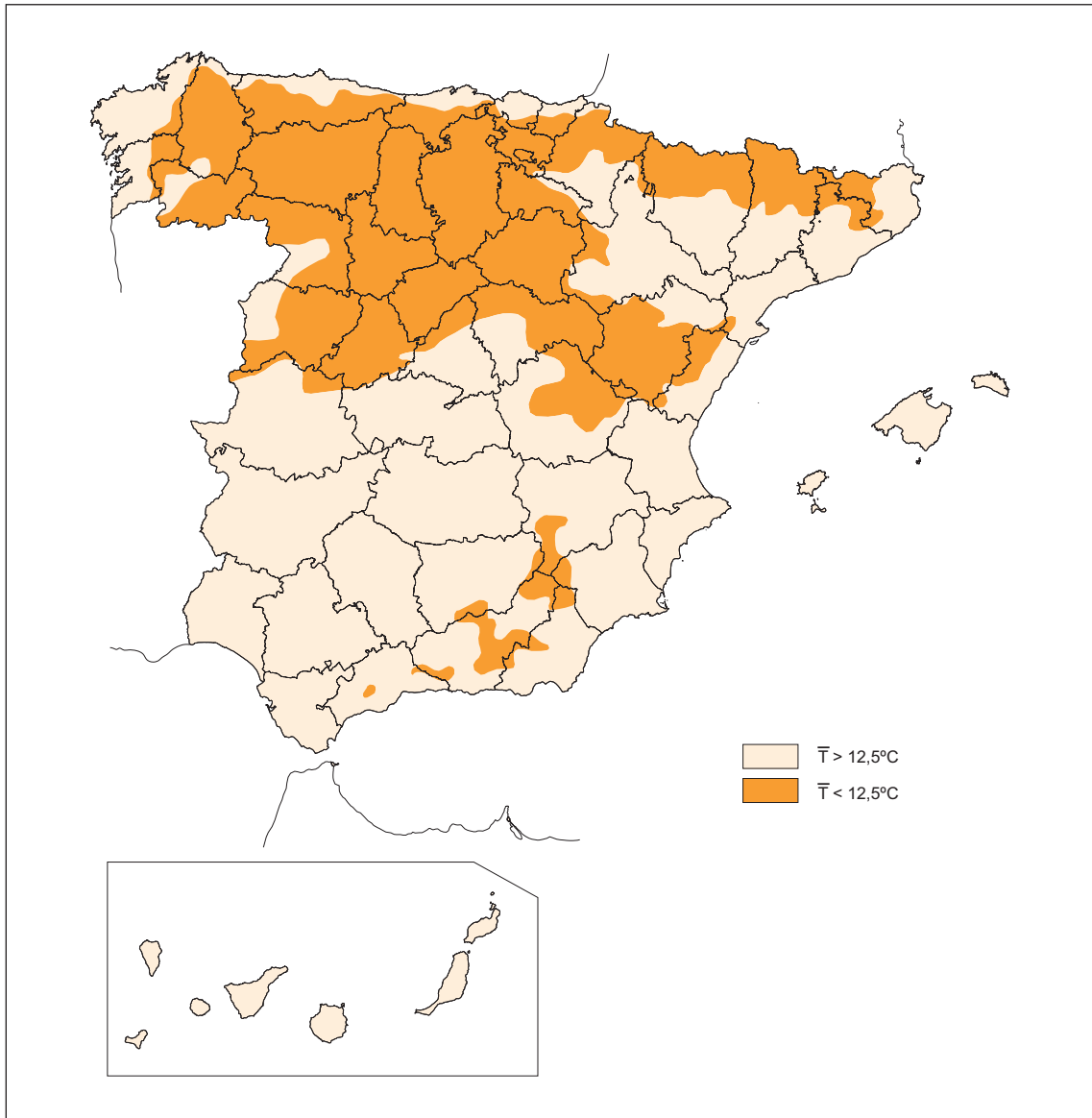


FIGURA 3.3. TEMPERATURA MEDIA ANUAL.

3.3.6. RESISTENCIA A LA CRISTALIZACIÓN DE SALES

La escollera puede resultar susceptible al deterioro por la presión que puedan ejercer ciertas sales al cristalizar, que pueden provenir:

- De la precipitación de dichas sales sobre los bloques de escollera, después del secado repetido de aguas que las contengan.
- De la existencia de una sal soluble formando parte de la roca.

Para evaluar la resistencia de la muestra a este fenómeno, se intenta reproducir en laboratorio mediante la realización de varios ciclos, en los que se procede a la saturación de la muestra de roca con una solución de agua salina, seguida de un secado lento en la estufa, con el fin de provocar la cristalización de las sales al evaporarse el agua de forma lenta.

El ensayo de laboratorio se puede llevar a cabo con cualquier solución salina para impregnar la muestra y con el número de ciclos que se desee. No obstante, normalmente se emplean los sul-

fatos de sodio o de magnesio, por experimentar un gran cambio de volumen al cristalizar⁹ y producir así mayores efectos mecánicos sobre las rocas que otros tipos de sales.

El resultado del ensayo se evalúa a través de la pérdida de masa que experimenta la muestra después de someterla a los correspondientes ciclos.

A los efectos de este documento se considera que no será necesario llevar a cabo los ensayos de resistencia a la cristalización de sales, en las siguientes circunstancias:

- Cuando los bloques de escollera presenten una absorción de agua menor o igual que el cero coma cinco por ciento ($w_{as} \leq 0,5\%$).
- Cuando presenten una absorción de agua superior al cero coma cinco por ciento y menor o igual al dos por ciento ($0,5 < w_{as} (\%) \leq 2$) y simultáneamente:
 - La roca no contenga minerales solubles ni se encuentre expuesta a ciclos de saturación-secado con aguas que puedan contener altas concentraciones de sales en disolución.
 - Cuando, según lo especificado en 3.3.5, resultara pertinente efectuar los ciclos hielo-deshielo en laboratorio y los resultados obtenidos en dichos ensayos concluyesen que la roca es resistente a los mismos.

Cuando, de acuerdo con lo indicado en los párrafos anteriores, se considere conveniente evaluar la resistencia de la escollera a la cristalización de sales, se efectuará el ensayo con sulfato de magnesio según la norma UNE EN 1367-2. Dicha norma es específica para áridos por lo que los resultados obtenidos con la misma deben tomarse con precaución¹⁰.

Se recomienda que la pérdida en peso experimentada por la muestra, después de someterse al ensayo descrito en UNE EN 1367-2, sea inferior al ocho por ciento ($MS \leq 8\%$).

Cuando los resultados obtenidos conforme a UNE EN 1367-2, resulten próximos al valor límite especificado para esta propiedad, pueden contrastarse mediante los siguientes procedimientos:

- Empleo de granulometrías mayores¹¹ y ensayo de las mismas según UNE EN 1367-2.
- Repetición del ensayo con una solución de sulfato sódico según UNE EN 12370.

3.3.7. EFECTO SONNENBRAND

El efecto Sonnenbrand es un tipo de desintegración de la roca que puede estar presente en algunos basaltos y que se manifiesta fundamentalmente a la intemperie. Los indicios de este fenómeno comienzan con la aparición de manchas en forma de estrella de color gris o blanco. En condiciones normales, se generan grietas capilares que se extienden de forma radial desde las manchas y se interconectan entre ellas, reduciendo, en consecuencia, la resistencia mecánica del bloque.

En la escollera de origen basáltico puede ser necesario determinar la presencia de signos del efecto Sonnenbrand; en tales circunstancias se recomienda someter a ensayo veinte (20) piezas de escollera, según el método establecido en la norma UNE EN 13383-2, debiendo ser en cada proyecto concreto, donde se especifiquen, en función de las características de cada obra, los límites para dicho fenómeno.

3.4. SÍNTESIS DE CARACTERÍSTICAS

En la tabla siguiente se resumen las principales características geométricas, físicas, químicas y de durabilidad que se han referido a lo largo de este capítulo.

⁹ Por este motivo se emplean en ocasiones los ensayos de cristalización de sales como sustitución de los de congelación-deshielo.

¹⁰ El tamaño pequeño del árido de ensayo no puede reproducir con exactitud la meteorización por cristalización de sales *in situ* de la escollera. La norma UNE EN 13383-1 recomienda un examen petrográfico del material de la roca y una identificación visual del modo de desintegración después del ensayo.

¹¹ Véase: UNE EN 13383-1. Anexo C.

TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS BLOQUES DE ESCOLLERA

GRUPO DE REQUISITOS	PROPIEDAD	NORMA	REQUISITO	OBSERVACIONES
GEOMÉTRICOS	Granulometría	UNE EN 13383-2	Husos HMB _{300/1000} HMB _{1000/3000}	—
	Forma	UNE EN 13383-2	($L/E > 3$) $\leq 15\%$	—
	Proporción de superficies trituradas o rotas	UNE EN 13383-1	Bloques redondeados; $RO < 5\%$	Se consideran redondeados los bloques con caras trituradas o rotas $\leq 50\%$
	Densidad seca	UNE EN 13383-2	$\rho_d \geq 2500$ kg/m ³	—
FÍSICOS	Resistencia a compresión simple, q_u	UNE EN 1926	Valor medio de la serie, tras despreciar el mínimo; $q_u \geq 80$ MPa	El proyecto puede justificar otros valores inferiores; ($\Delta q_u \leq 20$ MPa)
	Series de diez (10) probetas		Valor mínimo de la serie, desechando los dos más bajos; $q_u \geq 60$ MPa	
	Integridad de los bloques	UNE EN 13383-1	Inspección visual	—
			Ensayos destructivos	
			Ensayos no destructivos	
	Resistencia a la fragmentación	UNE EN 1097-2	$LA < 35\%$	Series de seis (6) piezas cuyas masas no difieran entre sí, más del veinticinco por ciento (25%)

TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS BLOQUES DE ESCOLLERA (CONTINUACIÓN)

GRUPO DE REQUISITOS	PROPIEDAD	NORMA	REQUISITO	OBSERVACIONES
QUÍMICOS Y DE DURABILIDAD	Estabilidad química	—	Composición mineralógica estable	Obtención de lixiviado según UNE EN 1744-3
	Estabilidad frente a la inmersión en agua	UNE 146510	Sin fisuración; $\Delta m/m \leq 0,02$	—
	Estabilidad frente a los ciclos humedad-sequedad	UNE 146511	$\Delta m/m \leq 0,02$	Deben realizarse al menos, cuando la escollera se encuentre en una zona inundable
	Absorción de agua	UNE EN 13383-2	$w_{as} \leq 2\%$	Si $w_{as} \leq 0,5\%$ la muestra puede considerarse resistente al hielo-deshielo
	Resistencia a congelación y deshielo	UNE EN 13383-2	$F \leq 6\%$	— Solamente se determina si: <ul style="list-style-type: none"> • $w_{as} \geq 0,5\%$ • Zona de heladas
	Resistencia a la cristalización de las sales	UNE EN 1367-2	Sulfato de magnesio; $MS \leq 8\%$	— No se determina si: <ul style="list-style-type: none"> • $w_{as} \leq 0,5\%$ • $0,5\% \leq w_{as} \leq 2\%$, y además verifique, simultáneamente: <ul style="list-style-type: none"> - Roca sin minerales solubles ni exposición a aguas con sales disueltas - Resistencia adecuada a ciclos hielo-deshielo
	Efecto Sonnenbrand	UNE EN 13383-2	Inspección visual	— Puede ser necesario realizar ensayos adicionales
				Únicamente en rocas de origen basáltico

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS Y MÉTODOS DE CÁLCULO

4.1. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE LA ESCOLLERA COLOCADA

4.1.1. PESO ESPECÍFICO

De los parámetros geomecánicos de los muros de escollera, el peso específico seco de los bloques γ_d , suele ser el mejor conocido. La tabla 4.1 incluye valores orientativos de los pesos específicos secos de algunas de las rocas de más frecuente uso en la ejecución de muros.

TABLA 4.1. PESO ESPECÍFICO SECO APROXIMADO DE ALGUNAS ROCAS

CLASIFICACIÓN	ROCA	γ_d (kN/m ³)
PLUTÓNICAS	Granitos sanos	26-27,5
	Sienitas y monzonitas	25-27
	Dioritas	25-27
	Gabros y peridotitas	29-30,5
FILONIANAS	Pórfidos	27-29
	Diabasas y ofitas	29-31
VOLCÁNICAS	Riolitas y traquitas	24,5-26
	Andesitas, traquiandesitas y dacitas	23-27,5
	Basaltos	27,5-30
METAMÓRFICAS	Cuarcitas	26-26,5
	Gneises	23-28
	Esquistos y pizarras muy sanas	22-26
	Piroxenitas y anfibolitas	28-30
	Mármoles	26,5-27,5
DETRÍTICAS	Conglomerados, pudingas y brechas muy cementados	20-27
	Areniscas muy cementadas	19-29
	Grauwacas	22-29
CARBONATADAS	Calizas	21-28,5
	Dolomías	22-28,5

De acuerdo con lo especificado en el capítulo 3, se recomienda que la densidad seca de los bloques sea superior o igual a dos mil quinientos kilogramos por metro cúbico ($\rho_d \geq 2500$ kg/m³), lo que da lugar a un peso específico seco mínimo de los bloques, de veinticuatro coma cincuenta y dos kilonewtons por metro cúbico, que puede aproximarse en la práctica a veinticinco ($\gamma_d = 24,52 \approx 25$ kN/m³).

A los efectos de este documento se define el peso específico aparente del muro de escollera como:

$$\gamma_{ap} = \gamma_d(1 - n)$$

donde:

γ_{ap} : Peso específico aparente del muro de escollera.

γ_d : Peso específico seco de los bloques.

n : Porosidad del muro de escollera.

En los ensayos realizados para la Dirección General de Carreteras¹ con rocas de pesos específicos secos comprendidos entre veinticinco y veintiséis y medio kilonewtons por metro cúbico ($25 \leq \gamma_d \leq 26,5 \text{ kN/m}^3$), se han obtenido pesos específicos aparentes de la escollera comprendidos entre diecisiete y diecinueve kilonewtons por metro cúbico ($17 \leq \gamma_{ap} \leq 19 \text{ kN/m}^3$), en función de las características de su colocación.

4.1.2. POROSIDAD

Se define la porosidad del muro de escollera n , como el cociente entre el volumen de huecos y el volumen total del muro. La porosidad del muro de escollera será función, entre otros aspectos, de:

- Curva granulométrica del material
- Tamaño relativo de los bloques frente a las dimensiones del muro.
- Calidad de la colocación de los bloques de escollera.
- Forma de los bloques.
- Rugosidad de los bloques.

En la literatura técnica existen diferentes ábacos y tabulaciones de valores usuales de la porosidad, generalmente para aplicaciones en escolleras vertidas o compactadas, así como algunos estudios teóricos sobre este parámetro (véase apéndice 3).

Existen muchos menos datos publicados respecto a la porosidad de las escolleras colocadas. En diques rompeolas en talud se han medido porosidades del orden de veintisiete centésimas ($n = 0,27$) para mantos de escollera colocada, con dos bloques de canto.

En los ensayos referidos en el epígrafe 4.1.1 de esta Guía, se obtuvieron porosidades comprendidas entre veinticuatro y treinta y seis centésimas ($0,24 \leq n \leq 0,36$). A los efectos de este documento, se recomienda la obtención de porosidades en los muros de escollera colocada, comprendidas aproximadamente entre veinticinco y treinta y cinco centésimas ($0,25 \leq n \leq 0,35$), con preferencia en la mitad inferior de dicho rango.

4.1.3. ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO

4.1.3.1. Consideraciones generales

La mayoría de las investigaciones de tipo teórico sobre escolleras se basan en ensayos de laboratorio realizados con materiales de menor tamaño que los realmente puestos en obra, por lo que uno de los problemas más importantes que se plantean es el de la representatividad de dichos ensayos respecto del comportamiento real de la escollera.

A la vista de lo anterior, resulta una práctica bastante habitual el empleo de criterios empíricos basados en el comportamiento real de estructuras similares², aplicándose cohesiones nulas ($c = 0$) y ángulos de rozamiento que dependen fundamentalmente de:

¹ UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES Y TECNOLOGÍA DE PROCESOS Y PROYECTOS (1990): *Estudio de la caracterización geomecánica de muros de escollera en obras de carretera*.

² En el campo de la escollera, en general, la fuente más abundante de datos suele provenir de la construcción de presas (escollera compactada).

- **Porosidad:** Para escolleras ejecutadas conforme a lo especificado en esta Guía, en general se ha constatado un incremento del ángulo de rozamiento interno con la disminución de la porosidad, y en consecuencia se ha comprobado un aumento del ángulo de rozamiento interno con el incremento del índice de densidad. Estos aspectos están relacionados con una cuidada ejecución del muro, tratando de conseguir los menores valores de porosidad posibles.
- **Tensión normal:** En las investigaciones realizadas se ha observado que el ángulo de rozamiento interno disminuye al aumentar las tensiones normales.
- **Resistencia a compresión simple de la roca:** Se trata de una de las propiedades más significativas para la caracterización de una roca, en la que influyen gran cantidad de factores tales como su naturaleza, grado de microfisuración, porosidad, etc. A igualdad en el resto de factores, se suelen obtener mayores valores del ángulo de rozamiento interno cuanto mayor es la resistencia a compresión simple de la muestra de roca, si bien únicamente hasta alcanzar un cierto límite.
- **Otros factores:** También suponen una mejora de las características de fricción de los bloques, su rugosidad (que puede relacionarse con el grado de meteorización y la técnica de extracción), el coeficiente de uniformidad (la literatura técnica refleja un ligero incremento del ángulo de rozamiento interno conforme crece el coeficiente de uniformidad), etc.

En el apéndice 3 se presentan algunos estudios empíricos sobre ángulos de rozamiento interno para escolleras vertidas y compactadas.

4.1.3.2. Escolleras colocadas

Apenas existen referencias publicadas sobre valores del ángulo de rozamiento interno en escolleras colocadas. No obstante, con carácter general se puede considerar que la colocación de los bloques de acuerdo con los criterios especificados en esta Guía, da lugar a mejores parámetros de resistencia al corte que si se tratara de escollera vertida.

A los efectos de este documento, para definir el ángulo de rozamiento interno de la escollera colocada, se recomienda partir de un ángulo de rozamiento denominado básico, que se corresponde aproximadamente con el de la escollera vertida (véase apéndice 3), aplicar un ligero aumento asociado a las características específicas de la escollera colocada (relativas fundamentalmente a aspectos de ejecución) y una pequeña disminución en función de las tensiones normales a que esté sometida:

$$\phi = \phi_b + \Delta\phi_e - \Delta\phi_n$$

donde:

ϕ : Ángulo de rozamiento interno a considerar en el cálculo de la escollera colocada, a los efectos de esta Guía

ϕ_b : Ángulo de rozamiento básico

$\Delta\phi_e$: Incremento del ángulo de rozamiento interno según las características de ejecución

$\Delta\phi_n$: Disminución del ángulo de rozamiento interno en función de la magnitud de las tensiones normales

Ángulo de rozamiento básico

Para los bloques que se usan habitualmente en la formación de muros de escollera colocada y, en ausencia de datos más específicos, se pueden tomar como referencia para la determinación del ángulo de rozamiento básico, los valores que se indican en este apartado. Para ello la escollera debe de cumplir las características indicadas en el capítulo 3 de este documento.

En relación con la resistencia a compresión simple se considera que, en el caso más general, realizando el ensayo en series de diez (10) probetas, la resistencia media obtenida (desechando el valor más bajo) es superior a ochenta megapascales (80 MPa) y la resistencia mínima (desechando los dos valores más bajos) es superior a sesenta megapascales (60 MPa), tal y como se establece en el epígrafe 3.2.2. Con estas condiciones, se recomienda considerar un valor del ángulo de rozamiento básico comprendido normalmente entre treinta y ocho y cuarenta y dos grados ($38^\circ \leq \phi_b \leq 42^\circ$).

A los efectos de esta Guía, podrán adoptarse los valores del ángulo de rozamiento básico que se incluyen con carácter orientativo en la tabla 4.2, para algunas de las rocas de más frecuente utilización en la ejecución de muros de escollera colocada. No obstante lo anterior, el proyectista podrá justificar la adopción de otros valores diferentes, no resultando recomendable que se encuentren por encima del rango propuesto con carácter general, en el párrafo precedente.

TABLA 4.2. VALORES APROXIMADOS DE ϕ_b , $\Delta\phi_e$ (°)

MATERIAL (*)	ϕ_b (°)	$\Delta\phi_e$ (°)
Granito muy sano	40-41	1-2
Gneis	41-42	1-2
Cuarcita sana	39-40	1-2
Basalto	40-41	1-3
Riolita y andesita	41-42	1-3
Sienita y granodiorita	41-42	1-3
Dolomías y calizas muy sanas	39-40	1-2
Conglomerados y brechas bien cementadas	39-41	1-2
Areniscas bien cementadas	38-39	1-2

(*) Valor medio: $q_u \geq 80$ MPa (desechando el valor más bajo de una serie de diez probetas).

Valor mínimo: $q_u \geq 60$ MPa (desechando los dos valores más bajos de una serie de diez probetas).

En el caso de que en el proyecto se justifique el empleo de rocas de menor resistencia que la indicada anteriormente, admitiéndose valores de resistencia media de sesenta megapascales (60 MPa) y de resistencia mínima de cuarenta megapascales (40 MPa), determinadas con los mismos criterios y series de probetas que se indican en el epígrafe 3.2.2, se deberán considerar valores más bajos para el ángulo de rozamiento básico que, con carácter general podrían obtenerse en una primera aproximación, reduciendo en unos cinco grados (5°) los indicados en la tabla 4.2.

Incremento del ángulo de rozamiento según las características de la ejecución

Como se ha indicado con anterioridad, el hecho de disponer la escollera colocada en lugar de vertida, implica un efecto de aumento de su ángulo de rozamiento interno.

Para que se pueda tener en consideración este aumento, deben cumplirse las indicaciones relativas a la ejecución que se incluyen en el capítulo 5 de este documento, y en particular resulta imprescindible que se verifiquen los siguientes aspectos:

- El paramento del intradós no deberá ser más vertical que el 1H:3V.
- Contrainclinación de las hiladas según proyecto, en general aproximadamente el 3H:1V.

- La sección transversal debe contar con un canto mínimo de dos ($n \geq 2$) bloques y una anchura mínima en coronación³ de dos metros (2 m).
- Colocación de los bloques formando un entramado tridimensional que dote al conjunto de la máxima trabazón posible.

Con estos requisitos relativos a la ejecución, se podrá considerar un aumento del ángulo de rozamiento interno comprendido con carácter general entre uno y tres grados ($1^\circ \leq \Delta\phi_e \leq 3^\circ$), dependiendo de la naturaleza de la roca empleada, según se especifica en la tabla 4.2.

La discriminación sobre cuál de los valores del rango debe tomarse, resulta una cuestión subjetiva que normalmente será difícil de discernir en la fase de proyecto, por estar ligada sobre todo a una buena ejecución del muro. Así pues, se recomienda la adopción de valores conservadores, si bien, en general se podrá tender a tomar valores altos dentro de los del rango propuesto en dicha tabla, si se observan además los siguientes aspectos durante la ejecución:

- Consecución de valores bajos de la porosidad del muro.
- Ejecución del muro por un maquinista experimentado asistido por un operario en la selección y colocación de cada bloque.
- Vertido de pequeñas cantidades de hormigón de consistencia seca para aumentar el número de contactos puntuales entre bloques.

Disminución del ángulo de rozamiento en función de la tensión normal

La disminución del ángulo de rozamiento interno en función de la magnitud de las tensiones normales, se puede estimar como:

$$\Delta\phi_n(^{\circ}) = \phi_n \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right) \geq 0$$

donde:

$\Delta\phi_n$: Disminución del ángulo de rozamiento interno por efecto de la presión normal que, en ningún caso podrá resultar negativo.

ϕ_n : Coeficiente expresado en grados sexagesimales. Salvo justificación en contra, a los efectos de este documento, deberá adoptarse un valor mínimo de siete grados ($\phi_n \geq 7^\circ$).

σ_n : Tensión normal máxima a que se encuentra sometida la sección objeto de estudio

p_a : Presión atmosférica, que se utiliza como referencia ($p_a = 0,1$ MPa).

A efectos prácticos, en este documento se recomienda determinar la tensión normal σ_n , en la sección más desfavorable (en general en la base del muro) y obtener la disminución del ángulo de rozamiento interno $\Delta\phi_n$, correspondiente a dicha sección. Este valor $\Delta\phi_n$, puede considerarse aplicable en todo el muro.

4.2. PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

4.2.1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA AL PROBLEMA

La propia naturaleza del muro de escollera colocada, constituido por yuxtaposición de bloques pétreos, de formas geométricas y tamaños diferentes, que permite cierta deformación y reordenación interna de su fábrica ante esfuerzos externos, genera una serie de singularidades, imprecisiones e incertidumbres en lo que a la adopción de un modelo de cálculo se refiere.

³ Conforme a lo especificado en el apartado 2.3, el proyecto podrá justificar valores de hasta un metro y medio (1,5 m) para muros con altura inferior a cinco metros (5 m).

En un muro de escollera, cada bloque se encuentra sometido a fuerzas exteriores procedentes de las piedras contiguas de la propia escollera, del empuje del material del trasdós del muro —influida en su caso por las oscilaciones del nivel freático— y de las cargas exteriores.

La rotura del muro puede producirse a cualquier altura (por cualquier superficie interior al mismo) sin que, a diferencia de otras tipologías, éste funcione como elemento rígido. Con carácter previo a la rotura se movilizará únicamente la resistencia al corte a través de la superficie en cuestión, cuyas condiciones en lo tocante a materiales afectados, estado de los contactos, características de ejecución, etc., pueden ser peores que las que podrían considerarse como medias para el muro en su conjunto.

Además de lo anterior resulta muy difícil, en la práctica, imponer en los cálculos mediante condiciones matemáticas, cuestiones relativas a la colocación, forma, tamaño de los bloques, tipo y cantidad de contactos entre los mismos, etc., aspectos todos ellos de gran importancia en la realidad.

En consecuencia, los muros de escollera colocada, presentan importantes diferencias conceptuales respecto a los muros de fábrica convencionales, que motivan que los cálculos puedan resultar menos ajustados al comportamiento real que en estos últimos, o en cualquier caso, menos avalados por la experiencia.

4.2.2. PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE CÁLCULO

4.2.2.1. Introducción

El proyecto del muro de escollera colocada se deberá abordar en general, de acuerdo con lo expuesto en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. No obstante, se indican a continuación algunas especificidades relacionadas con el cálculo de esta tipología.

Los principales modos de fallo que deben comprobarse son:

- Deslizamiento.
- Hundimiento.
- Estabilidad global.
- Estabilidad local.

Otros modos de fallo que pueden producirse (socavación, alteración química, meteorización, etc.) por lo general resultan difícilmente abordables a través de métodos de cálculo convencionales, debiendo evaluarse mediante comprobaciones específicas, y evitarse con una adecuada selección de los materiales y aplicación de determinados criterios constructivos. Estos aspectos tratan de reflejarse en los capítulos 3 y 5 de este documento.

4.2.2.2. Deslizamiento y hundimiento

La comprobación de los modos de fallo de deslizamiento y hundimiento puede abordarse con carácter general siguiendo las recomendaciones establecidas en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

4.2.2.3. Estabilidad global

El conjunto formado por el cuerpo del muro de escollera y su cimiento, puede verse inmerso en un fallo global sin que se produzcan antes otros fallos locales. Se formaría una superficie continua que lo englobase por completo, en la que los esfuerzos de corte superaran el valor de la resistencia del terreno que rodea al muro.

El análisis de la estabilidad global puede abordarse empleando métodos de cálculo de equilibrio límite, teniendo en cuenta las consideraciones incluidas al respecto en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

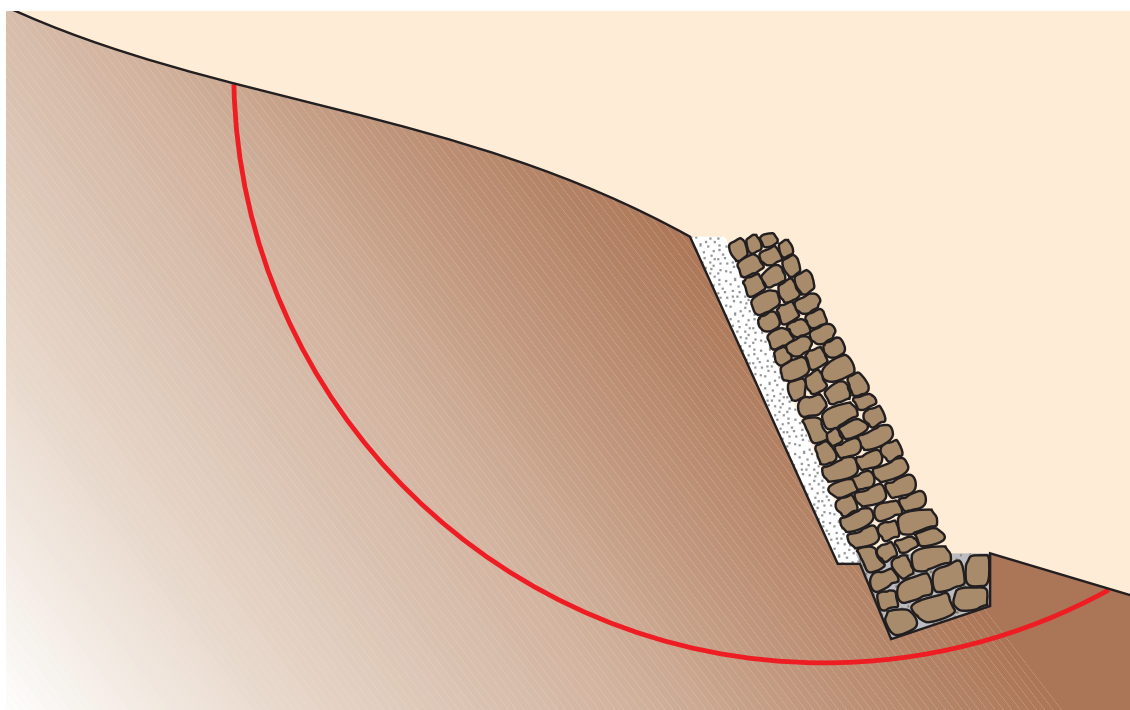


FIGURA 4.1. EJEMPLO DE SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL.

4.2.2.4. Estabilidad local

A los efectos de esta publicación, se entiende como modo de fallo de estabilidad local de un muro de escollera colocada, a aquel en que la superficie de rotura corta a dicho muro, es decir que implica la rotura del mismo a una altura determinada y por tanto la movilización de sus características resistentes, dejando una parte del muro por encima de la superficie de fallo y otra por debajo.

Como se ha indicado en el epígrafe 4.2.1, por la propia naturaleza del muro de escollera colocada, es muy difícil reproducir su comportamiento real mediante un modelo matemático de cálculo. En la literatura técnica se recogen propuestas de modelos de cálculo basados en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, considerando la escollera como un material no cohesivo ($c = 0$) y teniendo en cuenta únicamente la componente friccional de la resistencia, a través de un ángulo de rozamiento interno.

En este documento se opta también por considerar el muro como un terreno o material más, con sus correspondientes parámetros adecuados al método de cálculo y modelo de comportamiento de que en cada caso se trate.

Si no se dispusiera de datos más específicos sobre el caso concreto analizado, los parámetros a utilizar para el material tipo *muro de escollera colocada*, podrán obtenerse de esta publicación⁴. Además deben definirse los parámetros de cálculo del trasdós en su caso (normalmente material granular) y del resto de terrenos que intervienen, en un entorno razonablemente amplio del muro.

Así, pese a sus deficiencias teóricas⁵, debidas entre otros aspectos al tamaño relativo de los elementos individuales frente al del propio muro, que impiden en puridad la aplicación de métodos de

⁴ En todo caso, cuando se dispusiera de datos propios, se recomienda confrontarlos con el contenido de este documento.

⁵ La ley de Coulomb es aplicable para caracterizar un suelo como medio continuo, cuando el tamaño de las partículas que lo constituyen es despreciable frente al de un elemento que se tome para estudiar el comportamiento mecánico del suelo.

Al estudiar un muro de escollera, el tamaño relativo de las partículas (bloques) hace que no se pueda aplicar con propiedad la ley de Coulomb, puesto que ello llevaría a resultados en contra de la observación, como la imposibilidad de construir un muro de escollera con un ángulo del paramento mayor que el ángulo de fricción interna.

Si se supone un entorno del problema más amplio, puede llegar a suponerse que el tamaño de las partículas es pequeño en relación con el tamaño de la zona estudiada y aplicarse la ley de Coulomb, siquiera como aproximación al problema real.

cálculo propios de suelos granulares y medios continuos, lo más habitual resulta el análisis del muro de escollera frente al modo de fallo de estabilidad local, a través de modelos de cálculo de estabilidad de taludes, basados en las teorías del equilibrio límite.

A través de estos métodos de cálculo pueden estimarse los coeficientes de seguridad frente al modo de fallo de estabilidad local, que deberá analizarse a partir de superficies que, involucrando a los terrenos más próximos, corten al muro a diferentes alturas.

Hay que tener en cuenta, de todos modos, que las deficiencias teóricas del método hacen que su aplicación directa pueda dar lugar a algunos problemas prácticos que deberán corregirse para hacer viables los cálculos.

El principal problema es el de la imposibilidad teórica de construir un muro de escollera con un ángulo del paramento mayor que el ángulo de fricción interna ($\beta > \phi$).

En tal circunstancia, el cálculo —realizado normalmente a través de programas informáticos— puede indicar que la superficie de fallo con el coeficiente de seguridad menor, se produce a través del propio cuerpo del muro sin involucrar más elementos o terrenos, ya que dicho caso ($\beta \geq \phi$, $c = 0$), implica necesariamente y por definición, su propia inestabilidad. En la práctica no sucede así, pues según se ha puesto de manifiesto con anterioridad, existe una cierta trabazón entre bloques que algunos autores traducen en una cohesión ficticia⁶.

Si se siguen las recomendaciones para la ejecución del capítulo 5 de este documento, los bloques de escollera que conforman el cuerpo del muro se deben colocar asegurando una contra inclinación de las hiladas en torno al 3H:1V respecto a la horizontal. Por lo tanto, para que se produzca la rotura del cuerpo del muro a una determinada altura, con el consiguiente deslizamiento o salida de bloques del paramento, los empujes a que se ven sometidos los bloques de escollera, deben ser superiores a las fuerzas de rozamiento que se generan sobre el plano inclinado ascendente sobre el que se apoyan.

Así, una posible **metodología de cálculo** sería la de determinar, mediante teorías de equilibrio límite, el coeficiente de seguridad de superficies de rotura que en la parte en la que cortan al muro de escollera (y por tanto movilizan sus parámetros resistentes), tengan un ángulo de salida correspondiente al de la contra inclinación de las hiladas previsto en el proyecto⁷, que en general será de aproximadamente el 3H:1V, siguiendo las recomendaciones que se incluyen en el capítulo 5 de este documento. Las superficies de rotura que tuvieran un ángulo de salida distinto al de la contra inclinación de hiladas implicarían teóricamente, la rotura de bloques, por lo que serían, en principio menos desfavorables⁸.

En consecuencia, resulta de capital importancia **garantizar** que **en obra** se materialice de forma efectiva la **contra inclinación de las hiladas** prevista en el proyecto, aspecto que debe conseguirse en todas y cada una de ellas, ya que de lo contrario, habría superficies con características reales más desfavorables que las previstas en los cálculos de estabilidad y podrían obtenerse superficies preferentes de fallo no previstas.

Se debe analizar un número suficientemente elevado de superficies de rotura que, cumpliendo dicho condicionante geométrico, corten al muro a distintas alturas y afecten a diferentes zonas del

⁶ Algunos autores cifran dicha cohesión (bajo determinadas circunstancias) en el entorno de quince a veinte kilonewtons por metro cuadrado (15-20 kN/m²), si bien en este documento se ha optado por no considerar dicha cohesión ficticia y adoptar la metodología de cálculo que se expone, por considerar que representa mejor la realidad física de los muros de escollera colocada.

⁷ Aunque la contra inclinación prevista en el proyecto fuese más vertical que el 3H:1V, no se recomienda la toma en consideración, a efectos de cálculo de la estabilidad local, de valores superiores al recién indicado.

⁸ En el caso de que se usen programas informáticos de cálculo de estabilidad de taludes, que tantean distintas superficies de rotura con cualquier ángulo de salida de la superficie de deslizamiento, hasta encontrar la de menor coeficiente de seguridad, se puede usar también el siguiente artificio, si es que el programa permite dicha opción: al definir los parámetros que caracterizan el material que representa la escollera utilizando el modelo de Mohr-Coulomb, se introduce como ángulo de rozamiento, el valor que se haya estimado según los criterios del epígrafe 4.1.3, y la cohesión se define mediante una función tal, que tenga valor nulo cuando el ángulo de salida de la superficie de deslizamiento coincida con el ángulo de contra inclinación de las hiladas, y que tenga valores positivos y significativamente altos, cuando las superficies de rotura no cumplan esa condición. Con este artificio matemático, se incluye de alguna manera en el modelo, el condicionante de que la rotura del muro según superficies que corten a los bloques de escollera, implicaría la rotura de los mismos y por lo tanto tendría que vencer mayor resistencia.

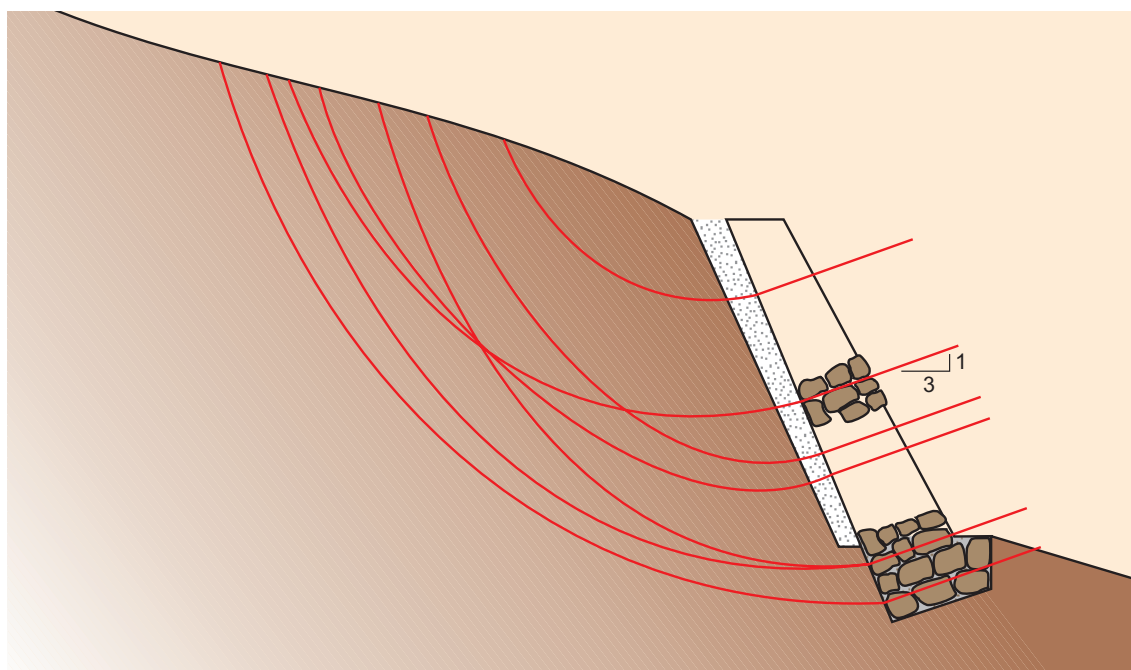


FIGURA 4.2. EJEMPLO DE SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD LOCAL.

terreno del trasdós, hasta encontrar la superficie de rotura con menor coeficiente de seguridad⁹. Este valor se deberá tomar como coeficiente de seguridad frente al modo de fallo de estabilidad local.

Además del empleo de esta metodología de cálculo, se recomienda realizar un **análisis de sensibilidad** de la solución final a ligeras variaciones de los parámetros de cálculo. En especial se debe comprobar la variación del coeficiente de seguridad, con la de los parámetros geotécnicos de los terrenos circundantes y al considerar distintos ángulos de rozamiento interno del muro, dentro de los rangos propuestos para el mismo en este documento. Asimismo resulta de gran importancia analizar superficies de rotura con ángulos de salida de la superficie de fallo a través del muro de escollera, inferiores a la contrainclinación prevista para las hiladas¹⁰, llegando incluso a la horizontal. De esta manera se puede observar el efecto que tendría que, por condicionantes de ejecución, pudiera llegar a quedar alguna zona del muro con menor contrainclinación que la considerada en el proyecto.

Este análisis de sensibilidad proporciona información sobre los aspectos que podrían resultar críticos en la solución propuesta, lo cual puede resultar de gran ayuda, tanto en el proyecto como en la ejecución del muro de escollera colocada, fundamentalmente teniendo en cuenta que la metodología de cálculo propuesta, es sólo una **aproximación al comportamiento real del muro**, mucho más complejo en la práctica.

4.2.3. HIPÓTESIS DE CÁLCULO Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD

Respecto a la adopción de las hipótesis de cálculo y los valores numéricos de los coeficientes de seguridad para cada modo de fallo, estos dependerán de la combinación de acciones a considerar, obteniéndose en cada caso según se especifica en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

En cuanto al valor mínimo del coeficiente de seguridad frente al modo de fallo de estabilidad local, se recomienda considerarlo igual o superior a los que se exijan para el modo de fallo de estabilidad global.

⁹ En el caso de que la superficie de rotura más desfavorable atravesara el cimiento del muro, habría que realizar un análisis más detallado, teniendo en cuenta que los parámetros resistentes de la cimentación son superiores a los del cuerpo del muro, gracias al hormigón del cimiento.

¹⁰ Se recomienda en todo caso, tantear al menos una pendiente de salida de valor vez y media menor que la propuesta para la hiladas, es decir 4,5H:1V.

RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN Y CONTROL DE LOS MUROS DE ESCOLLERA COLOCADA

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se incluyen una serie de recomendaciones y reglas de buena práctica para la ejecución y el control de los muros de escollera colocada en obras de carretera.

Debe tenerse en cuenta que buena parte de las características del muro de escollera se alcanzan, además de por las de los materiales empleados, por una cuidada ejecución del mismo que debe comprender una adecuada selección y colocación de cada uno de los bloques, de modo que constituyan un conjunto lo más compacto, estable y duradero posible.

En los apartados siguientes se recogen una serie de recomendaciones, válidas tanto para muros de escollera colocada de sostenimiento como de contención, considerando de modo independiente los aspectos relativos a la cimentación y al cuerpo del muro. Finalmente se incluyen algunas indicaciones para el control y auscultación.

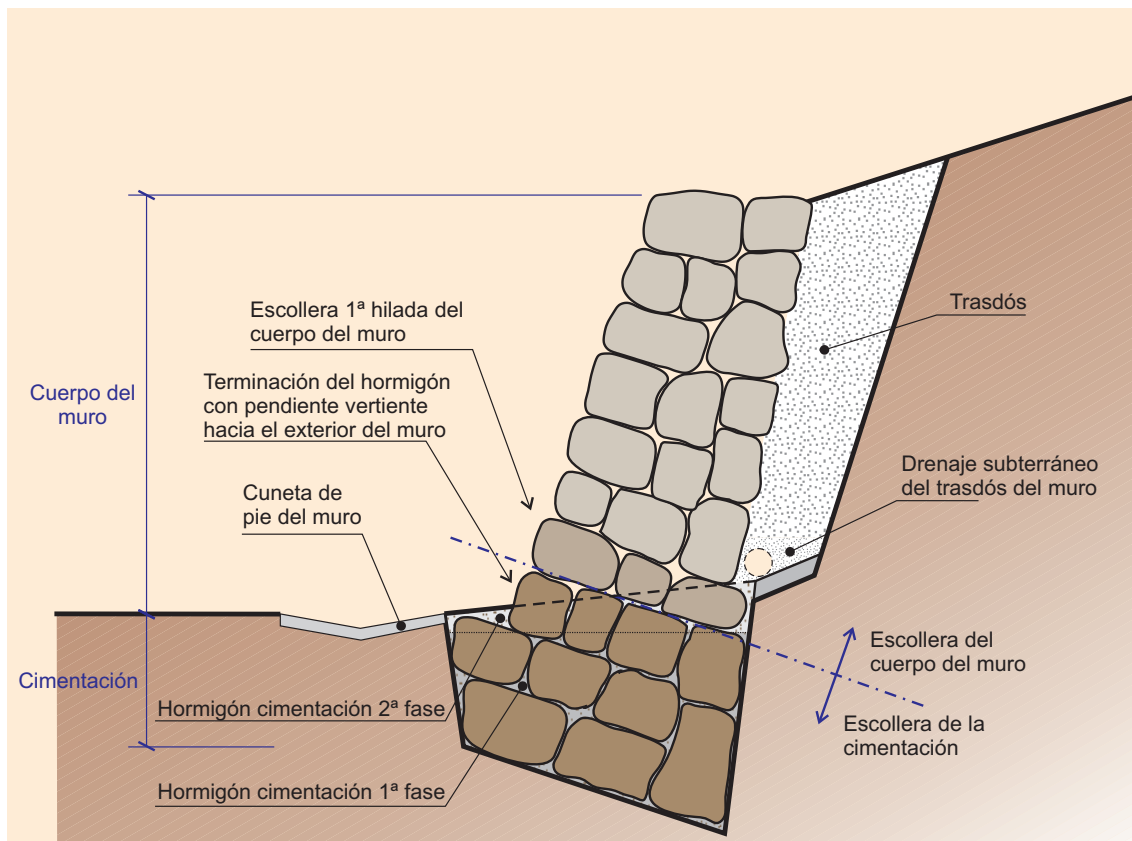


FIGURA 5.1. PARTES DE UN MURO DE ESCOLLERA.

5.2. CIMENTACIÓN

Con carácter previo a la ejecución del muro, se comprobará que el talud o ladera natural esté en condiciones adecuadas: superficie regular, ausencia de salientes, zonas con restos vegetales y otros materiales no deseados, afloramiento de aguas, etc. Se limpiarán los materiales extraños y se refinará la excavación hasta dejar superficies regulares. Los posibles afloramientos de aguas se tratarán según se expone en el apartado 2.5 de esta Guía.

Se debe excavar la cimentación hasta la cota definida en el proyecto, comprobando que las características del terreno se corresponden con las previstas, siendo recomendable una profundidad mínima¹ de un metro (1 m). El fondo de excavación de la cimentación se ejecutará normalmente con una contrainclinación respecto a la horizontal de valor aproximado 3H:1V (véase apartado 2.2), lo que facilita la colocación de las siguientes hiladas de escollera.

Una vez efectuada la excavación del cimientto, se debe proceder a la colocación de escollera en su interior, hasta alcanzar aproximadamente la cota del terreno natural en el intradós.

Posteriormente, se deberá proceder al vertido de hormigón² de las características especificadas en el proyecto, de forma que se rellenen los huecos existentes entre los bloques de escollera³, con lo que se consigue una mayor rigidez y homogeneidad en la cimentación, en lo referente a transmisión de tensiones al terreno, asientos, etc. Este requisito es imprescindible para poder considerar el cimientto como un elemento rígido.

Dependiendo de la porosidad obtenida en la escollera del cimientto y de las características del terreno, el volumen de hormigón a verter suele estar comprendido entre doscientos setenta y cinco y trescientos cincuenta litros por metro cúbico de cimientto (275-350 l/m³).



FIGURA 5.2. COLOCACIÓN DE BLOQUES EN EL CIMIENTTO.

¹ En caso de que exista cuneta por el intradós, la profundidad de cimentación se medirá a partir de su vértice (véanse figuras 2.1 y 2.2).

² Véase en el apartado 2.2 una posible excepción al criterio general de hormigonado del cimientto

³ En función de la porosidad de la escollera del cimientto y de las características del fondo y las paredes de la excavación, podría resultar conveniente emplear un recebo pétreo constituido preferiblemente por fragmentos de dicha escollera, antes de proceder al hormigonado del cimientto. Este recebo debe carecer de finos y permitir que el hormigón fluya y rellene los huecos.

El hormigonado del cimiento normalmente se efectúa en dos fases:

- En la primera fase, que comprende el relleno de la práctica totalidad del cimiento, la superficie que resulte debe estar conformada por caras rugosas de bloques pétreos en la mayor proporción posible, recomendándose que sobresalgan al menos quince o veinte centímetros (15-20 cm) de la superficie de hormigonado, para garantizar un mejor contacto con la primera hilada de bloques del cuerpo del muro, que debe presentar una contrainclinación aproximada en torno al 3H:1V, como se indicó previamente.
- La segunda fase se ejecutará normalmente una vez colocada la primera hilada del cuerpo del muro. En ella el hormigón deberá enrasar con la cota del terreno natural en el intradós y habrá de comprobarse además que la superficie final resultante no tenga puntos bajos ni constituya un lugar de acumulación de agua o producción de encharcamientos, para lo que se debe dotar al plano superior del cimiento de una ligera pendiente.

Asimismo debe tenerse en cuenta que durante la ejecución del cimiento puede ser necesaria la realización de algunos de los elementos y sistemas de drenaje subterráneo del muro, conforme a lo especificado en el proyecto.

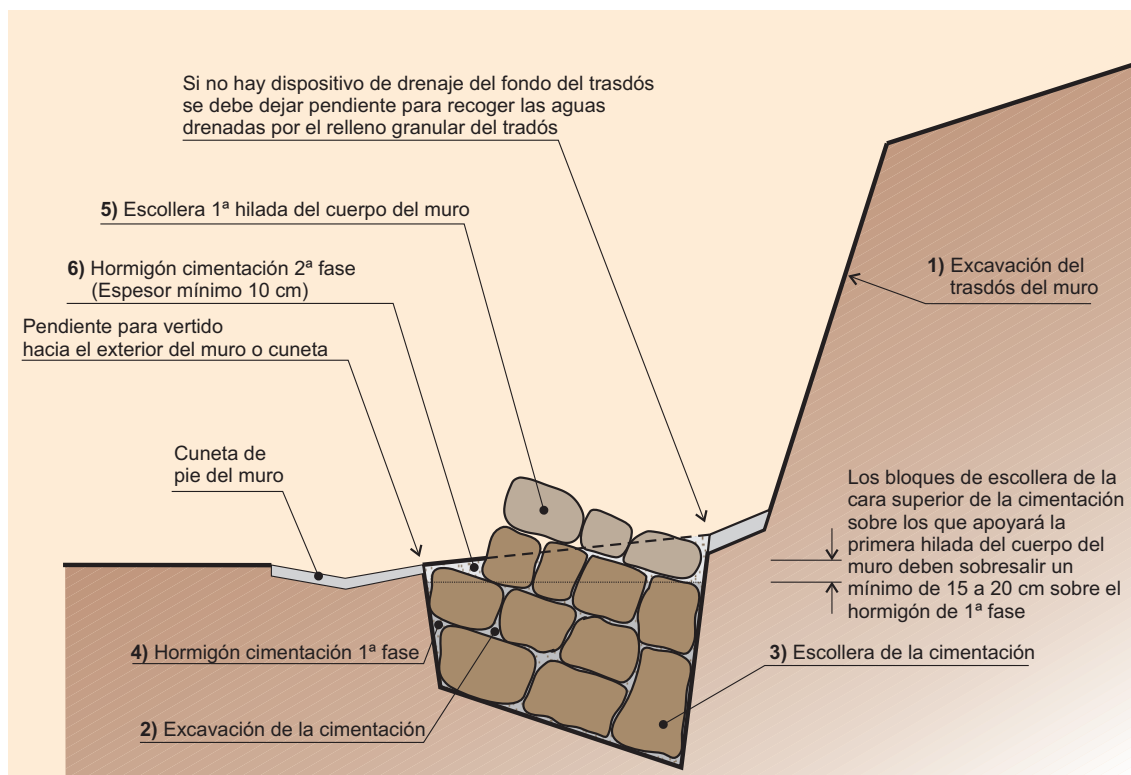


FIGURA 5.3. FASES DE EJECUCIÓN DE LA CIMENTACIÓN



FIGURA 5.4. HORMIGONADO DE LA CIMENTACIÓN.

5.3. CUERPO DEL MURO

En todas las fases de la construcción del muro y en particular en la ejecución del cuerpo del mismo, deberá contarse con un operario auxiliar que asista al maquinista en la selección y colocación de cada bloque, así como en la materialización de la geometría del muro: para ello deberá ir provisto, cuando menos, de cinta métrica y escuadra con nivel. Este trabajo deberá ser revisado por medio de equipos topográficos.

Durante la colocación de los bloques el operario auxiliar comprobará además, que cada uno de ellos cumple aquellas características reflejadas en el capítulo 3 de este documento, que se puedan verificar visualmente.



FIGURA 5.5. FORMACIÓN DEL CUERPO DEL MURO.

Las piedras de escollera que conforman el cuerpo del muro se colocarán en éste procurando tanto su propia estabilidad como la materialización de una contrainclinación de las hiladas de bloques en torno al 3H:1V respecto a la horizontal. Dicha contrainclinación tiene una repercusión directa en la estabilidad del muro y dificulta una eventual caída de piedras tanto durante la construcción como durante su vida útil.

Los bloques se colocarán formando un entramado tridimensional que dote al conjunto de la máxima trabazón que sea posible. Resulta recomendable alternar orientaciones de bloques en que la dimensión mayor sea paralela al paramento con otras en que su longitud mayor esté orientada del trasdós al intradós.

La sección transversal del muro debe estar constituida por bloques del mismo huso granulométrico (véase apartado 3.1), evitando que quede constituido transversalmente por un bloque en la cara vista, de los tamaños y demás características recomendados en este documento y otros de menor tamaño o características diferentes hacia el interior del mismo.

Con el fin de asegurar una adecuada trabazón y estabilidad, se debe procurar que los huecos entre piedras de escollera contiguas se reduzcan cuanto sea posible⁴, para lo que se seleccionará específicamente cada bloque. Cada piedra de escollera deberá de apoyar su cara inferior en al menos dos bloques de la hilada inferior y estar en contacto con los bloques laterales adyacentes, además de con otros dos de la hilada superior.

Se tratará de evitar que los contactos entre bloques de una hilada coincidan, según secciones por planos verticales, con los de la hilada inferior, impidiendo de este modo la formación de columnas de bloques de escollera. Análogamente debe tratar de evitarse en lo posible, la formación de filas horizontales de bloques es decir, las sucesivas hiladas deberán buscar la máxima imbricación que sea posible con las inmediatamente superior e inferior. Además debe obtenerse la contrainclinación de los bloques sobre planos normales al del paramento visto.



FIGURA 5.6. ENTRAMADO DE BLOQUES QUE EVITA LA FORMACIÓN DE FILAS Y COLUMNAS.

⁴ Como orden de magnitud puede hablarse de un tamaño máximo de la apertura de huecos entre bloques, (también conocida como *tolerancia de apertura*) de unos quince centímetros (15 cm) aproximadamente.

Tal y como se ha puesto de manifiesto con anterioridad, el rozamiento entre bloques es un parámetro de capital importancia en la estabilidad del muro y se produce por fricción entre caras rugosas y aristas vivas de los mismos. En algunos casos pueden adoptarse las siguientes medidas para aumentar la superficie de contacto, o para mejorar el rozamiento entre superficies:

- Podrán recebarse los bloques de escollera de mayor tamaño con material pétreo de calidad similar, preferiblemente fragmentos de la misma procedencia obtenidos en el proceso de voladura. En cualquier circunstancia, los bloques deberán apoyarse directamente⁵ unos sobre otros y nunca sobre el recebo. Esta operación se realizará por hiladas, debiendo garantizarse que no se produzcan movimientos al cargar una de dichas hiladas con el peso de la inmediatamente superior.
- Podrán verse pequeñas cantidades de hormigón (en proporción prácticamente despreciable en relación al volumen del muro) de consistencia seca sobre ciertos bloques, al objeto de aumentar el número de contactos puntuales y la rugosidad entre caras de piedra de escollera contiguas.

El hormigón se extenderá en su caso, después de la ejecución de cada hilada, sobre aquellas superficies de los bloques que vayan a quedar en contacto con los de la hilada inmediatamente superior. En ningún caso estas pequeñas cantidades de hormigón deben suponer una merma en las posibilidades de drenaje del muro.

Por reiteración de los procesos definidos a lo largo de este apartado, deberá procederse a la colocación de las sucesivas hiladas de bloques, hasta alcanzar la coronación del muro con la geometría prevista en el proyecto.

Cuando la altura del muro exceda de la que puede alcanzarse con la maquinaria disponible, puede que sea necesario tener que recurrir a la ejecución de un relleno provisional (generalmente un caballón de tierras) frente al paramento visto, que sirva como plataforma de trabajo. Esta plataforma deberá retirarse una vez concluya la construcción del muro, cuidando de que no quede material de relleno entre los intersticios de la escollera, que podría mermar sus propiedades drenantes.



FIGURA 5.7. EJECUCIÓN MEDIANTE EXCAVADORA CON CAZO.

⁵ El apoyo de bloques sobre piedra de recebo puede dar lugar a la rotura de ésta con la consiguiente producción de movimientos.



FIGURA 5.8. EJECUCIÓN MEDIANTE EXCAVADORA CON PINZA.

En determinadas circunstancias concretas, puede que sea necesario recurrir con carácter puntual, al vertido de hormigón de consistencia blanda o fluida en el cuerpo del muro⁶, cuando se desee una reducción de la porosidad, el trabajo conjunto de algunos bloques, o por otras circunstancias que deberán justificarse en el proyecto. Habrá de garantizarse, en todo caso, una porosidad mínima en las hiladas de bloques en torno al diez por ciento ($n \geq 10\%$) para permitir el drenaje de éstas.

Finalmente, podrá efectuarse un recebado de los mayores huecos que se observen en la cara vista, habiendo de garantizarse en todo caso, el buen drenaje del muro⁷.

Además debe tenerse en cuenta que los trabajos de ejecución del cuerpo del muro deben llevarse a cabo en coordinación con los del trasdós y con los de los elementos y sistemas de drenaje.

Por otra parte y con carácter general se estará a lo especificado en el PG-3 cuando las unidades de obra de que se trate dispusieran de un artículo al respecto, así como a lo indicado para los elementos y sistemas de drenaje en relación con la construcción y conservación de las carreteras, en la norma 5.2-IC *Drenaje superficial* y en la OC 17/2003 *Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera*, o aquellas que las sustituyan.

En función de las necesidades de auscultación del muro, pueden resultar necesarias operaciones complementarias como acabado del mismo, que deberán definirse en cada caso concreto.

5.4. CRITERIOS BÁSICOS SOBRE CONTROL

5.4.1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades y aspectos a controlar en cada muro de escollera dependerán de factores específicos relativos a su ubicación, etapas constructivas, importancia y geometría de la obra, etc. El proyecto deberá definir los principales aspectos objeto de control durante la construcción del muro, así como durante su vida útil.

⁶ Téngase en cuenta que la tipología: muro de escollera hormigonada, que genera esta práctica, no constituye el objeto de este documento, en el cuál se supone como premisa básica un comportamiento de los bloques como elementos aislados, yuxtapuestos, con fricción en los contactos, sin intervención de conglomerante alguno.

⁷ En algunos muros de contención de pequeña altura en la Cornisa Cantábrica, se ha completado este recebo con pequeñas cantidades de tierra vegetal, aplicándose posteriormente un tratamiento de hidrosiembra, obteniéndose una buena integración ambiental.

A continuación se incluyen algunas recomendaciones básicas de aplicación en la gran mayoría de los casos.

5.4.2. CONTROL DE LOS BLOQUES DE ESCOLLERA

Antes de iniciar la producción, se reconocerá cada acopio, préstamo o procedencia, determinando su aptitud para la ejecución de las obras. Se comprobará que los bloques de escollera cumplen los requisitos establecidos en el proyecto respecto de las propiedades que se describen en el capítulo 3. Para ello se tomarán muestras y se realizarán los correspondientes ensayos, según las especificaciones de dicho capítulo.

Estos ensayos deberán repetirse siempre que se vaya a utilizar una nueva procedencia para la escollera, o si existe un cambio importante en la naturaleza de la roca o en las condiciones de extracción, que puedan afectar a sus propiedades. Deberá comprobarse además la retirada de la montera en la extracción de la escollera y la exclusión de vetas no utilizables, en su caso.

Adicionalmente, por cada veinte mil metros cúbicos (20.000 m³) de material producido, se efectuarán los siguientes ensayos:

- Determinación de la distribución de masas según UNE EN 13383-2.
- Determinación del porcentaje de componentes de escollera con una relación, longitud dividido por espesor, mayor que tres ($L/E > 3$), según UNE EN 13383-2.
- Determinación de proporción de superficies trituradas o rotas según UNE EN 13383-1.

Se examinará la descarga al acopio o en el tajo, desechando los materiales que, a simple vista no sean aceptables. Se debe tratar de evitar en todas las fases de manipulación de la piedra (voladura en cantera, carga, transporte y puesta en obra) la rotura de sus aristas, que puede originar un redondeo de las mismas.

Durante la ejecución del muro, puesto que los bloques de escollera se seleccionan y colocan uno a uno, el operario auxiliar que asista al maquinista comprobará visualmente que los bloques cumplen los requisitos geométricos de tamaño, forma y proporción de superficies trituradas o rotas.

5.4.3. CONTROL DE EJECUCIÓN

El control de ejecución deberá llevarse a cabo en los términos previstos en el proyecto, si bien comprenderá cuando menos:

- **Control de procedimiento:** Debe verificarse la correcta colocación de cada uno de los bloques, tratando de obtener la máxima trabazón entre ellos y el mínimo volumen de huecos que sea posible. En esta labor resulta fundamental el operario auxiliar que debe estar presente en las diferentes fases de ejecución.

Al concluir cada una de las hiladas y al finalizar los trabajos del muro, se harán controles visuales. Mediante este tipo de controles puede decidirse el recebo de ciertos bloques, el vertido de hormigón entre alguno de ellos, etc.

Por otra parte, los valores de porosidad y peso específico de los muros de escollera colocada son difíciles de determinar *in situ*. La literatura técnica recoge algunas experiencias de ejecución de diferentes tramos de prueba en los que se determina la porosidad a través del peso específico de la roca y de la cubicación obtenida a partir de una serie de bloques de peso conocido⁸.

- **Control geométrico:** Deberán materializarse bases topográficas en terrenos próximos no afectados por la ejecución de las obras, que permitan llevar a cabo el control del muro

⁸ Cuando no se utilice recebo en la escollera de cimentación del muro, puede medirse el volumen de hormigón empleado en el relleno de la misma para estimar su porosidad, de forma aproximada.

durante las diferentes etapas de su construcción. Particularmente importante resulta el control topográfico de su alineación e inclinación⁹.

Después del replanteo del muro, en los diferentes trabajos de ejecución del mismo, el operario auxiliar comprobará al menos por medio de cinta métrica y escuadra con nivel, la inclinación del intradós, el espesor, la contrainclinación de las hiladas de bloques y su correcto apoyo en los adyacentes, conforme se proceda a su construcción. Esta operación deberá realizarse en cada hilada.



FIGURA 5.9. REFERENCIAS GEOMÉTRICAS PARA AYUDA DEL MAQUINISTA.

5.4.4. AUSCULTACIÓN

Cuando se considere necesaria la auscultación de una obra, deberá elaborarse un plan específico, siguiendo las recomendaciones generales de la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, que podrán servir como punto de partida.

Una vez finalizada la construcción, se recomienda efectuar un seguimiento topográfico periódico, al menos de la coronación. Para ello, puede resultar adecuada la materialización de una superficie plana en la misma, preferiblemente de hormigón, sobre la que ubicar las correspondientes referencias topográficas (véase figura 5.10).

Con carácter general, se recomienda el control periódico de la nivelación de la coronación y, si fuera posible, también de la colimación de la misma, o en defecto de estos, la realización de un control topográfico que permita conocer los movimientos de las referencias dispuestas en las direcciones (x, y, z). En ciertos casos, también puede resultar conveniente el seguimiento topográfico de referencias dispuestas al pie (véase figura 5.11) o sobre el paramento visto del muro.

En circunstancias en las que la estabilidad pueda resultar precaria, por ejemplo cuando se empleen muros de escollera dentro de un plan de actuaciones para corrección de deslizamientos, suele resultar interesante instalar tuberías inclinométricas que pueden utilizarse, además, como piezómetros. Para ello normalmente se disponen en el trasdós o en la base del muro, con profundidad suficiente para alcanzar terreno estable. La elección del diámetro de la tubería inclinométrica depende de la magnitud de los movimientos esperables.

⁹ Es recomendable que esta operación se efectúe, al menos, cada dos o tres (2 ó 3) hiladas de construcción.



FIGURA 5.10. CORONACIÓN HORMIGONADA PARA LA MATERIALIZACIÓN DE REFERENCIAS TOPOGRÁFICAS.



FIGURA 5.11. MURO DE ESCOLLERA DE SOSTENIMIENTO CON CAMINO DE SERVICIO AL PIE, UTILIZABLE PARA LA COLOCACIÓN DE REFERENCIAS TOPOGRÁFICAS.

APÉNDICES

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA Y RENDIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE ESCOLLERA

A-1.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA MAQUINARIA

La máquina más adecuada para la ejecución de un muro de escollera colocada será normalmente la excavadora de orugas con equipo retro-excavador con cuchara o pinzas. Las características del trabajo a realizar, aconsejan el empleo de maquinaria sobre orugas con potencia mínima de ciento quince kilowatios (115 kW).

Cuando se utilicen pinzas, pueden considerarse como más adecuadas, a priori, las llamadas de demolición o de escollera, que se acoplan al balancín de la excavadora. En caso de utilizar cazo, la capacidad de éste deberá ser de aproximadamente uno coma cinco metros cúbicos (1,5 m³), si bien ello dependerá del tamaño máximo de la escollera a colocar.



FIGURA A-1.1. EXCAVADORA CON CAZO.

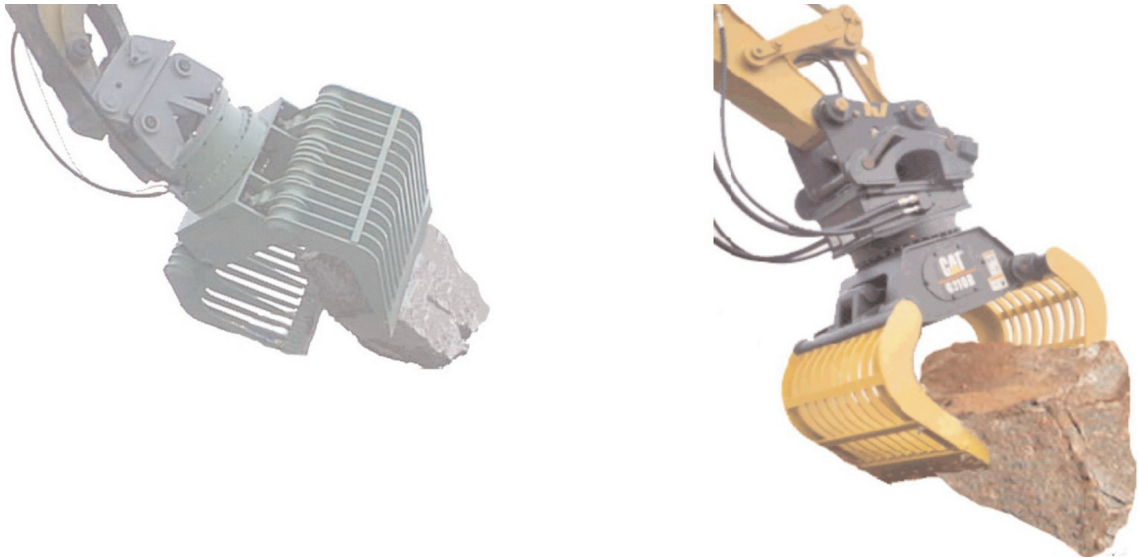


FIGURA A-1.2. PINZAS DE ESCOLLERA.

A-1.2. CICLO BÁSICO EN LA COLOCACIÓN DE LOS BLOQUES DE ESCOLLERA

Como operación preliminar, debe estudiarse la ubicación tanto de la maquinaria como del lugar donde se acopien las piedras de escollera, adoptándose una solución en que el operador tenga buena visibilidad de ambas áreas y se produzca el mínimo número de movimientos que sea posible.

El **ciclo básico** de colocación de un bloque de escollera en el cuerpo del muro se compone de las siguientes fases:

- Colocación de la piedra dentro del cazo o captura de la misma con las pinzas.
- Maniobra con la piedra cargada.
- Descarga de la piedra sobre el paramento del muro.
- Posicionamiento correcto de la piedra en el muro.
- Regreso al acopio de piedras de escollera.



FIGURA A-1.3. PINZA DISPUESTA PARA COGER UN BLOQUE.

La colocación del bloque dentro del cazo, o su captura con la pinza, comprende una etapa inicial consistente en empujar y girar la piedra situada en el acopio, de forma que quede en posición favorable para proceder, en una segunda etapa, a cargarla o capturarla.

Para una mayor facilidad en la colocación de las piedras, antes de que la excavadora cargue cada una de ellas, debe estimarse la posición en que se va a colocar el bloque en el muro, para que al descargarlo quede ya aproximadamente en su posición definitiva.

Una colocación deficiente dentro del cazo o pinza obligará a movimientos ineficaces de la piedra sobre el muro. A menudo, será mejor reiniciar el ciclo básico si se aprecia que la piedra no se posiciona correctamente. En esta primera fase del ciclo básico tiene mayor influencia la habilidad del maquinista que la capacidad o potencia de la máquina.

Las operaciones necesarias para la colocación de las piedras deben realizarse en todo caso de forma tal, que no se produzcan impactos que puedan afectar a la parte ya ejecutada del muro.

Una vez que el bloque ha sido colocado en el muro, con el visto bueno del operario auxiliar, el maquinista debe cerrar el ciclo básico con la vuelta al acopio, donde iniciará un nuevo ciclo al coger el siguiente bloque.

A-1.3. RENDIMIENTOS MÁS HABITUALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE ESCOLLERA COLOCADA

La producción en la construcción de muros de escollera depende de tres factores fundamentales a tener en cuenta, tanto en la elección de la maquinaria, como en su aspecto operativo:

- Tamaño y forma de los bloques de escollera.
- Potencia de la máquina y capacidad del cazo o pinza.
- Duración del ciclo básico y habilidad del maquinista.

En la figura A-1.4 se recogen, a título meramente orientativo, los rendimientos medios que suelen obtenerse en la ejecución de muros de escollera colocada, en función de la distancia al acopio de bloques, obtenidos a partir de diversas observaciones in situ. Como puede deducirse de la figura, resulta fundamental situar el acopio de los bloques de escollera lo más cerca posible de la posición de trabajo de la máquina, dado que la velocidad de desplazamiento de una máquina de orugas es, en general, lenta.

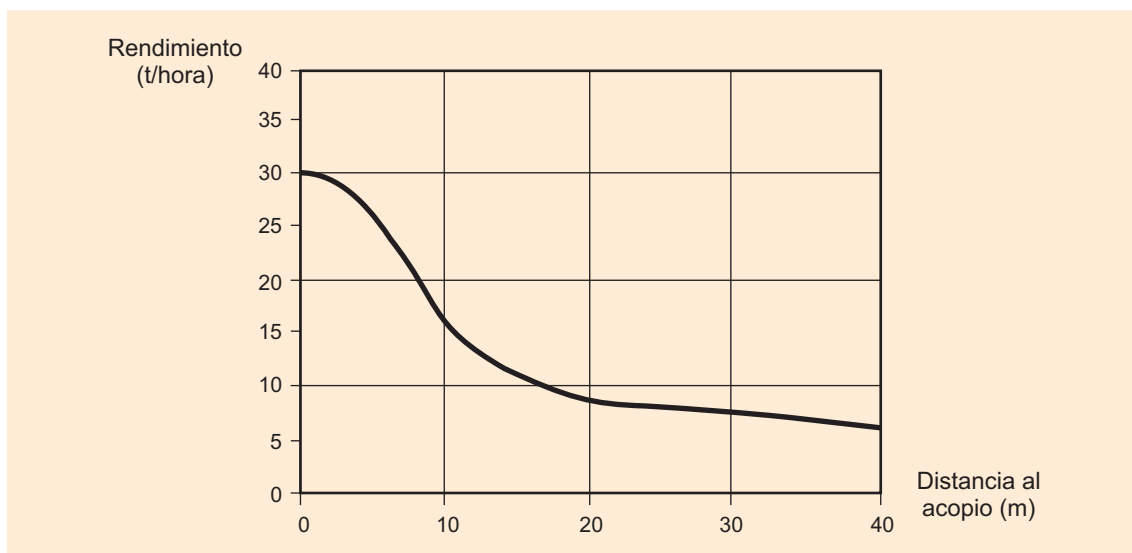


FIGURA A-1.4. RENDIMIENTOS MEDIOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE ESCOLLERA COLOCADA.

A los valores obtenidos de la figura se les pueden aplicar los coeficientes de corrección de la tabla A-1.1, obtenidos de forma empírica en diferentes observaciones, en función de la habilidad del palista, forma de la escollera y útil de colocación.

Los valores de rendimiento obtenidos pueden verse afectados también por otros factores difíciles de evaluar a priori, como la topografía, climatología, etc. Cuando se emplee más de un factor con valor superior a la unidad, se recomienda ser conservador en la elección de los mismos.

TABLA A-1.1. COEFICIENTES CORRECTORES DE LOS RENDIMIENTOS MEDIOS

FACTOR	CONSIDERACIÓN	COEFICIENTE
Habilidad del palista	Excelente	1,4
	Buena	1,2
	Normal	1,0
Forma de la escollera	Prismática	1,2
	Cúbica	1,0
	Irregular	0,8
Útil de colocación	Cazo	1,0
	Pinza	1,3

ESCALA DE METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS (ISRM)

GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIO DE RECONOCIMIENTO
I	Roca sana o fresca	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad.
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas.
IV	Roca meteorizada a muy meteorizada	Más de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma discontinua.
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a un suelo. La estructura original de la roca se mantiene intacta.
VI	Suelo residual	La roca está totalmente descompuesta en un suelo y no puede reconocerse ni la textura ni la estructura original. El material permanece «in situ» y existe un cambio de volumen importante.

ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE ESCOLLERAS VERTIDAS Y COMPACTADAS

A-3.1. ESTUDIOS SOBRE LA POROSIDAD

A-3.1.1. ESCOLLERAS VERTIDAS

La mayoría de los datos disponibles sobre la porosidad de escolleras vertidas procede de la realización de obras marítimas y portuarias. Como principal conclusión puede extraerse que la porosidad obtenida en mantos de diques rompeolas en talud, construidos con bloques de escollera, depende del número de piezas que constituyen la sección transversal (canto) de la capa en cuestión y de las características de los bloques, si bien las diferencias observadas no son demasiado importantes.

TABLA A-3.1. POROSIDAD DE MANTOS DE ESCOLLERA DE DIQUES ROMPEOLAS EN TALUD

BLOQUE TIPO	N.º PIEZAS (CANTO)	POROSIDAD, n
Escollera lisa	2	0,38
Escollera rugosa	2	0,37
Escollera rugosa	3-4	0,40

A-3.1.2. PEDRAPLENES Y ESCOLLERAS COMPACTADAS

En relación con los pedraplenes, el apartado 331.7 del PG-3 indica que la porosidad del pedraplén experimental compactado (que sirve para determinar, en cada caso concreto, el modo específico de puesta en obra de esta unidad), ha de ser menor del treinta por ciento ($n < 30\%$).

Por otra parte, la mayoría de la información disponible sobre escolleras compactadas proviene de la construcción de presas de materiales sueltos. Se apunta en la literatura técnica como principal conclusión, que la porosidad varía con el espesor de la tongada, la energía de compactación y la naturaleza de la roca. Suele ser habitual la obtención de valores en torno a veinte o veinticinco centésimas ($0,20 \leq n \leq 0,25$). En la tabla A-3.2 se ofrece una síntesis de los resultados disponibles para más de cien (100) presas de escollera, en función del tipo de roca.

TABLA A-3.2. POROSIDAD EN PRESAS DE ESCOLLERA COMPACTADA

TIPO DE ROCA (COMPACTADA)	n_{\min}	n_{med}	n_{\max}
Granito y gneis	0,15	0,23	0,30
Cuarcita	0,16	0,19	0,22
Basalto	0,20	0,25	0,31
Andesita y riolita	0,20	0,23	0,27
Sienita, diorita y granodiorita	0,14	0,21	0,25
Caliza	0,16	0,21	0,25
Arenisca	0,18	0,24	0,33

A-3.1.3. APROXIMACIONES TEÓRICAS

Entre los estudios de tipo teórico más clásicos pueden citarse aquellos que se efectúan suponiendo que el material en cuestión puede asimilarse a un sistema de esferas. Si todos los bloques fueran perfectamente esféricos e iguales entre sí, los valores máximo y mínimo de la porosidad se deducirían de la posición relativa entre esferas.

Para un número infinito de esferas iguales, el empaquetamiento (o fábrica) denominado cúbico, se produce cuando cada esfera es tangente a otras seis, dando lugar con ello a una porosidad $n_{cub} = 0,4764$. El llamado empaquetamiento romboédrico es más compacto y en él cada esfera es tangente a otras doce, da lugar a $n_{min} = 0,2595$.

Pueden obtenerse porosidades superiores a n_{cubr} , si bien a partir de un número reducido de esferas de igual diámetro.

Si se introducen otras familias de esferas de menor tamaño entre los huecos dejados por las primeras, la porosidad se reduce, siendo muy difícil bajar de cuatro o cinco centésimas ($n = 0,04-0,05$), lo que puede conseguirse con tres o cuatro tamaños, seleccionados específicamente a tal efecto.

A-3.2. ESTUDIOS SOBRE EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO

A-3.2.1. ESCOLLERAS VERTIDAS

Los valores del ángulo de rozamiento interno recomendados en la literatura técnica para escolleras vertidas, suelen variar normalmente entre treinta y cuatro y cuarenta y cuatro grados ($34^\circ \leq \phi \leq 44^\circ$), dependiendo fundamentalmente de dos factores: el tamaño de los bloques y su forma.

La forma de los bloques: redondeados o angulosos, incide claramente obteniéndose valores más altos del ángulo de rozamiento cuando los contactos entre partículas incluyen aristas vivas y superficies rugosas, que cuando las superficies son redondeadas (véase figura A-3.1).

Por otra parte, el tamaño de las partículas también resulta un factor a tener en cuenta con carácter general, si bien a partir de un cierto valor, las variaciones obtenidas resultan relativamente poco significativas.

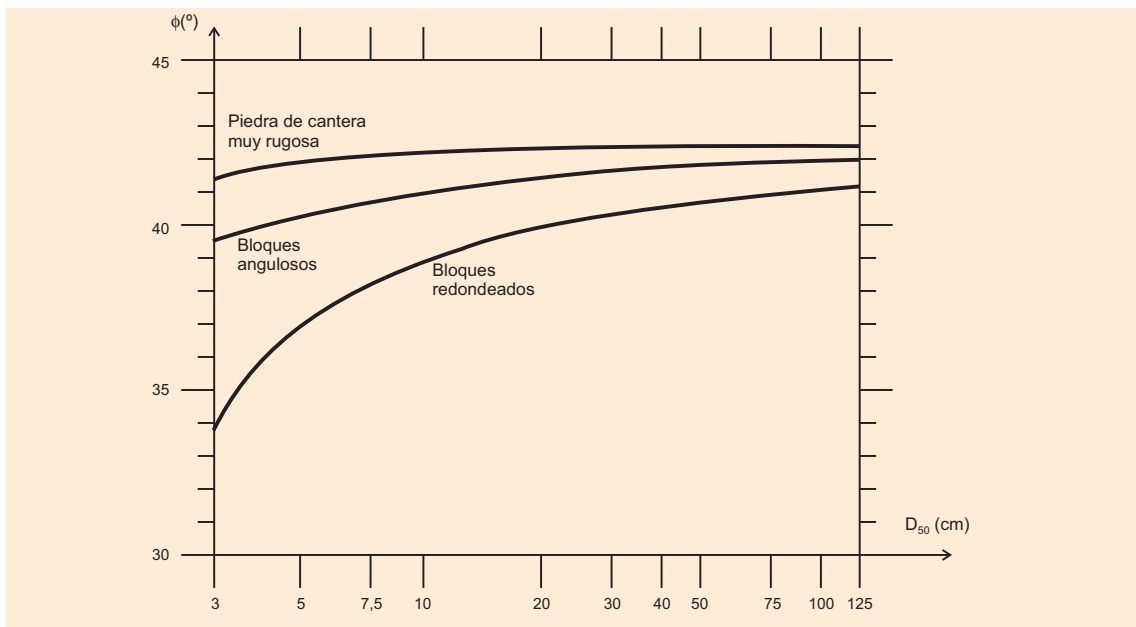


FIGURA A-3.1. ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO PARA ESCOLLERAS VERTIDAS¹.

¹ US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (EEUU). FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION-FHWA (1989): *Design of Riprap Revetment*. FHWA IP 89016.

A-3.2.2. ESCOLLERAS COMPACTADAS

La mayor parte de la información disponible sobre escolleras compactadas proviene de la realización de presas de materiales sueltos. En la tabla A-3.3 se ofrece una síntesis de los resultados obtenidos en más de cien (100) presas de escollera, en función del tipo de roca.

TABLA A-3.3. ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO EN PRESAS DE ESCOLLERA COMPACTADA

TIPO DE ROCA (COMPACTADA)	$\phi_{\min} (^{\circ})$	$\phi_{\text{med}} (^{\circ})$	$\phi_{\max} (^{\circ})$
Granito	37	41	45
Gneis	40	43	45
Cuarcita	36	39	42
Basalto	37	41	45
Andesita y riolita	39	42	46
Sienita, diorita y granodiorita	38	42	46
Caliza	38	40	43
Arenisca	33	37	42

El índice de densidad² es uno de los factores que más influyen en el valor del ángulo de rozamiento interno. En la literatura técnica se recogen incrementos del ángulo de rozamiento interno de entre dos y cinco grados ($\Delta\phi = 2-5^{\circ}$) para muestras del mismo material sometidas a iguales presiones normales, cuando su índice de densidad se incrementa desde cincuenta hasta ochenta y cinco centésimas ($I_{Df} = 0,50$; $I_{Df} = 0,85$).

Por otra parte, diferentes estudios realizados sobre escolleras compactadas, obtienen como principal conclusión que se produce una disminución del ángulo de rozamiento interno al incrementarse la presión de confinamiento. En este sentido resultan sumamente ilustrativos los trabajos de Leps (1970), Marachi (1972), Charles y Watt (1980), etc. y más recientemente los de Duncan (2004). En la figura A-3.2 se representan los resultados obtenidos por Leps (1970) a partir de 109 ensayos en presas y por Duncan (2004) a partir de 226, sobre la variación del ángulo de rozamiento con la presión normal a la superficie de rotura.

Por este motivo, en algunos proyectos de presas se escogieron valores del ángulo de rozamiento interno próximos a los superiores de entre los incluidos en la tabla A-3.3 para las zonas de bajo nivel de confinamiento (parte alta de la presa), y valores más próximos a los inferiores para las zonas sometidas a mayores presiones de confinamiento (parte baja de la presa).

² **Índice de densidad:** Relación entre los índices de poros e , o pesos específicos γ , que se indica:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

donde:

- I_D : Índice de densidad.
- e, γ : Índice de poros y peso específico correspondientes al estado analizado.
- e_{\min}, γ_{\min} : Índice de poros y peso específico mínimo.
- e_{\max}, γ_{\max} : Índice de poros y peso específico máximo.

La relación entre la porosidad n y el índice de poros e , resulta: $e = n/(1 - n)$.

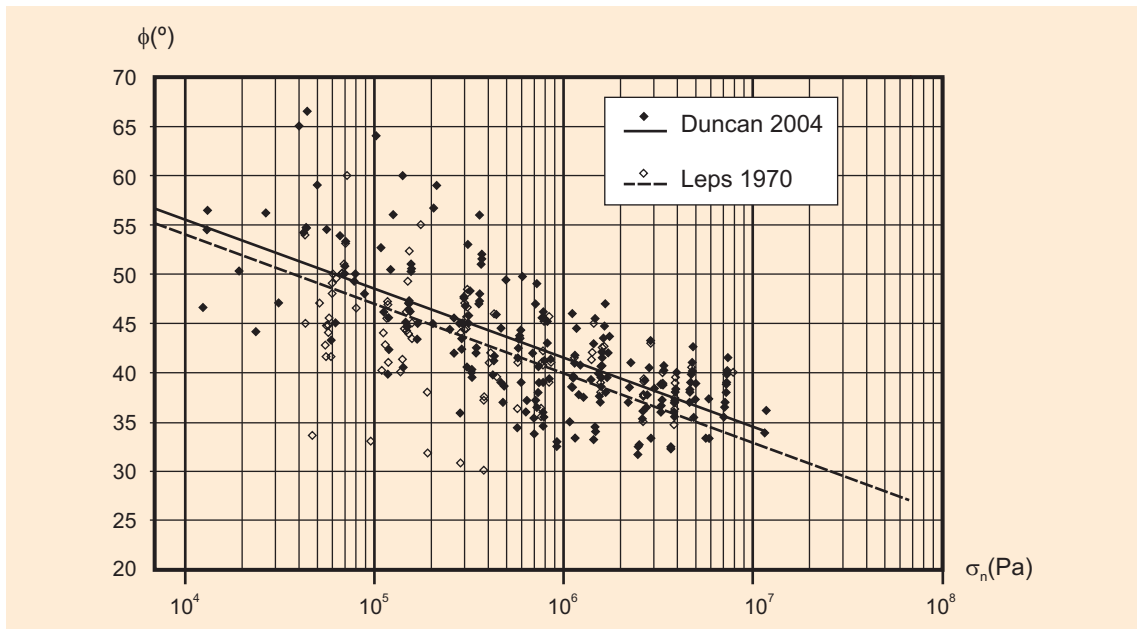


FIGURA A-3.2. EXPERIENCIAS DE LEPS (1970) Y DUNCAN (2004).

A-4.1. NORMAS UNE

Las normas UNE citadas en esta Guía son las siguientes:

- UNE 103101.** Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- UNE 103103.** Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- UNE 103104.** Determinación del límite plástico de un suelo.
- UNE 103204.** Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.
- UNE 103205.** Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.
- UNE 103406.** Ensayo de colapso en suelos.
- UNE 103601.** Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.
- UNE 146510.** Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de inmersión en agua.
- UNE 146511.** Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de los ciclos de humedad-sequedad.
- UNE EN 1097-2.** Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
- UNE EN 1367-2.** Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio.
- UNE EN 1744-3.** Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos.
- UNE EN 1926.** Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a compresión.
- UNE EN 12370.** Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.
- UNE EN 13383-1.** Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE EN 13383-2.** Escolleras. Parte 2: Métodos de ensayo.

A-4.2. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2003): *Normas UNE referidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*¹.
- Comité Español de Grandes Presas (1998): *Materiales de roca para presas de escollera. Síntesis y recomendaciones*.
- De Cea Azañedo, J. C. y Olalla Marañón, C.; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (1991): *Monografía M 18. Resistencia al corte de escolleras*.
- Dirección General de Carreteras: *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*².
- Dirección General de Carreteras (2003): *Orden Circular 17/2003. Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera*.
- Dirección General de Carreteras (2003): *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.
- Dirección General de Carreteras (1989): *Terraplenes y pedraplenes*.
- Dirección General de Carreteras (1981): *Desmontes*.
- Ducan, J. M. (2004): *Friction Angles for Sand, Gravel and Rockfill*, Kenneth Lee Memorial Seminar. Long Beach (EE.UU.)
- Hoek, E. (2000): *Rock Engineering*, ed. Balkema, Países Bajos.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. y Bawden, W. F. (1995): *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, ed. Balkema, Países Bajos.
- Instituto Geográfico Nacional: *Atlas Nacional de España*, fascículo 9: Climatología.
- Jiménez Salas, J. A. y otros (1975 a 1981): *Geotecnia y cimientos* (volúmenes I al III), editorial Rueda, Madrid.
- Martín Soldevilla, M. J. y Aberturas Ajenjo, P.; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (1997): *Monografía M 59. Nuevas aproximaciones al diseño de obras marítimas*.
- Ministerio de Fomento (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*³.
- Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) (1986): *Soil Mechanics-Design Manual 7.01*.
- Serrano González, A. (1996): *Mecánica de las rocas*, ETSICCP, Universidad Politécnica de Madrid.
- US Army Corps of Engineers (1986): *EM 1110-2-2904. Design of Breakwaters and Jetties*.
- US Army Corps of Engineers (1990): *EM 1110-2-2303. Construction with Large Stone*.
- US Department of Agriculture (2004): *Ingeniería de caminos rurales*.
- US Department of Transportation. Federal Highway Administration (FHWA) (1989): *FHWA IP 89016. Design of Riprap Revetment*.

¹ Publicación en CD-ROM.

² Se recomienda el empleo de la publicación en CD-ROM de la Dirección General de Carreteras.

³ Real Decreto 2661/1998 de 11 de diciembre (BOE del 13 de enero de 1999), por el que se aprueba la Instrucción de hormigón estructural, EHE. Modificado por Real Decreto 966/1999 de 11 de junio (BOE del 24 de junio).

A los efectos de este Guía, todas las referencias al articulado de la misma son relativas a dicho texto, vigente en el momento de su publicación.