

ANEJO B

ESPECIFICACIONES SOBRE MATERIALES DE CANTERA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DE ABRIGO

Preámbulo

El objetivo del anejo *Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo* es proporcionar información sobre las fuentes de suministro, funciones en la estructura, propiedades, durabilidad y costes de explotación de las escolleras naturales y el todo uno de cantera que se emplea en los mantos de los diques de abrigo en talud, en las banquetas de cimentación y sus mantos de protección en diques verticales o mixtos, y en las protecciones contra la socavación. Este anejo ha sido redactado por Francisco Esteban Lefler (FCC), Noelia González Patiño (Dragados) y Miguel Vázquez Romero (Dragados).

18 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

B.1. Ámbito de aplicación	19
B.2. Marco Normativo: UNE-EN 13383	20
B.3. Fuentes de suministro	22
B.3.1. Consideraciones económicas	22
B.3.2. Máximo tamaño posible	27
B.4. Funciones en la estructura y exposición	29
B.4.1. Generación de volumen	29
B.4.2. Filtro	32
B.4.3. Resistencia a la acción mecánica del oleaje y corrientes	33
B.4.4. Posición: seca, sumergida y en carrera de marea	34
B.5. Propiedades	36
B.5.1. Propiedades intrínsecas	37
B.5.2. Propiedades inducidas por la explotación de la cantera	41
B.5.3. Propiedades inducidas por la puesta en obra	45
B.6. Durabilidad	50
B.6.1. Cualidades de durabilidad de las rocas: evaluación cualitativa	51
B.6.2. Alternativas para escolleras de baja durabilidad	55
B.7. Costes de explotación de canteras	55
Referencias	55

B.1 Ámbito de aplicación

El presente Anejo es de aplicación a las escolleras naturales, clasificadas o no, y al todo uno de cantera que se emplea en los diferentes mantos de los diques de abrigo en talud, en las banquetas de cimentación y sus mantos de protección en diques verticales o mixtos, y en las protecciones contra la socavación. Es decir, con carácter general, a las obras que constituyen el objeto de la presente ROM 1.1

Las condiciones de filtro entre diferentes capas y de estabilidad frente a la erosión interna se tratan en el Manual que forma parte de esta ROM 1.1.

Las escolleras y todo uno objeto del presente Anejo son las que se utilizan para:

- Diques en talud:
 - Núcleo
 - Protecciones contra la socavación
 - Filtros y capas intermedias
 - Capas exteriores de bermas de pie
 - Mantos de protección:
 - Principal a sotamar del dique
 - De coronación
 - Interior en el lado más abrigado
- Diques verticales o mixtos:
 - Núcleo de la banqueta de cimentación
 - Mantos de protección de la banqueta
 - Protecciones contra la socavación

Se excluyen del ámbito de aplicación la grava y el balasto para capa de enrase y los áridos para hormigones y mezclas asfálticas.

No se incluyen soluciones alternativas, como las escolleras de árido siderúrgico, recicladas o el empleo de geotextiles y similares para contener arenas o materiales más finos para las capas anteriormente mencionadas. Debe tenerse en cuenta que estas soluciones requieren la modificación de las ecuaciones de verificación habitualmente empleadas, por implicar alteraciones fundamentales en sus bases de partida, tanto implícitas como explícitas.

Es decir, el presente Anejo se aplica a los materiales de cantera considerados tradicionales en la construcción de diques de abrigo.

Las propiedades y cualidades que se tratan en el presente anejo están íntimamente ligadas a las ecuaciones y procedimientos numéricos y experimentales de verificación de los diques de abrigo, por lo que su coherencia con las bases de partida debe ser contrastada.

20 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

Las escolleras y los materiales de cantera en general se obtienen a un coste relativamente reducido, que se incrementa de manera importante con la distancia de transporte. Con carácter general las obras de abrigo demandan la utilización de grandes cantidades de materiales de cantera, cuya disponibilidad condiciona su propia viabilidad. De esta manera, las especificaciones y las bases de partida del diseño deben tener en cuenta las propiedades de los materiales de cantera disponibles a distancia económica del dique.

La disponibilidad de fuentes de suministro de escollera a distancia económica es fundamental para la viabilidad del proyecto. La falta de estudios de canteras apropiados que verifiquen la disponibilidad de materiales para las obras y permitan evaluar sus costes con aproximación es necesaria para evitar sobrecostes de importancia.

B.2 Marco Normativo: UNE-EN 13383

La Norma Europea EN 13383 fue aprobada por CEN (Comité Europeo de Normalización) en 2002 y recibe el rango de norma nacional mediante la publicación de la UNE-EN 13383 ese mismo año. De forma que todas las normas nacionales anteriores que puedan resultar técnicamente divergentes quedan anuladas.

Debe tenerse en cuenta que se trata de una norma que principalmente fija requisitos, pero cuyo objeto intrínseco es la evaluación de la conformidad de escolleras mediante una designación normalizada, que pueda dar lugar a un marcado o etiquetado del producto. Por lo que no debe ser considerada necesariamente como una norma de calidad.

La serie de Normas Europeas EN 13383 fue elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 154. Áridos, cuya Secretaría fue desempeñada por la BSI (British Standard Institution). Las normas correspondientes españolas contienen las siguientes partes:

- EN 13383-1:2002 (Marzo 2003) –Escolleras. Parte 1: Especificaciones. Esta norma especifica las características de los áridos naturales, artificiales o reciclados y mezclas de estos materiales para su uso como escolleras, proporcionando además los procedimientos para la evaluación de la conformidad para su empleo.

Esta norma también indica que habitualmente en estructuras hidráulicas se utilizan áridos menores que los aquí especificados, debiendo aplicarse en estos casos normas europeas para otros usos finales de los áridos.

- EN 13383-1/AC (Octubre 2004) –Escolleras. Parte 1: Especificaciones (Erratum). En el caso de áridos reciclados, se incluyen en las normas existiendo normas de métodos de ensayo específicas para aquéllos que se encuentran en avanzado estado de elaboración. Para materiales de origen nuevo o no habitual, sin embargo, el trabajo de normalización no se encuentra tan avanzado, por lo que en esta norma se especifica que, cuando estos materiales se pongan en el mercado como áridos, deben cumplir totalmente con esta norma y, además, con la reglamentación nacional sobre sustancias peligrosas (Anexo ZA de esta norma) dependiendo de su uso específico previsto, el cual definirá las características y requisitos exigibles.
- EN 13383-2:2002 (Junio 2003) – Escolleras. Parte 2: Métodos de ensayo. Esta norma especifica los métodos de ensayo para áridos naturales, artificiales y reciclados para su uso

como escollera.

Por otra parte, los requisitos para otros usos finales de los áridos no incluidos en el objeto del presente Anejo están especificados en las siguientes normas europeas:

- prEN 12620 – Áridos para hormigón
- prEN 13043 – Áridos para mezclas bituminosas y revestimientos superficiales para carreteras
- EN 13055 – Áridos ligeros
- prEN 13139 – Áridos para mortero
- prEN 13242 – Áridos para materiales no ligados e hidráulicamente ligados para uso en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras
- prEN 13450 – Áridos para balasto

Mientras que los procedimientos de ensayo para otras propiedades de áridos están cubiertos por partes de las normas europeas siguientes:

- EN 932 - Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos
- EN 933 - Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos
- EN 1097 - Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos
- EN 1367 - Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos
- EN 1744 - Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos
- EN 13179 - Ensayos de los áridos fillers empleados en las mezclas bituminosas

La Norma UNE-EN 13383-1 incluye los siguientes anexos:

- Anexo A (Informativo): Límites de granulometría gruesa, ligera y pesada
- Anexo B (Informativo): Guía sobre la integridad de los bloques
- Anexo C (Informativo): Guía sobre la resistencia de la escollera al hielo-deshielo y a la cristalización de sales
- Anexo D (Normativo): Control de producción en fábrica
- Anexo E (Informativo): Propiedades e información que incluye la descripción de la escollera
- Anexo F (Informativo): Capítulos de esta Norma Europea relativos a los requisitos esenciales de la Directiva UE “Productos de Construcción”.

La Norma UNE-EN 13383-2 incluye los siguientes anexos:

- Anexo A (Informativo): Ejemplo de un informe de muestreo

22 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

- Anexo B (Informativo): Ejemplo de una distribución de tamaños de partículas de una granulometría gruesa
- Anexo C (Informativo): Ejemplo de una distribución de masas (método de referencia)
- Anexo D (Informativo): Ejemplo de una distribución de masas (método alternativo)
- Anexo E (Informativo): Densidad del agua
- Anexo F (Informativo): Precisión para la determinación de densidad de partículas y absorción de agua – Repetibilidad, r, y Reproducibilidad, R
- Anexo G (Informativo): Orientaciones sobre muestreo para ensayos

B.3 Fuentes de suministro

La primera decisión, que se ha de tomar en fase de proyecto, debe ser la de abrir una cantera propia para la obra, o suministrar a través de canteras comerciales ya existentes.

Para la elección de las fuentes de suministro (canteras) será preferible, a igualdad de otras condiciones, las que estén sancionadas por la práctica, entendiéndose como tal el empleo de escolleras en diques y protecciones cercanas, sometidas a condiciones similares y que hayan demostrado un adecuado comportamiento a lo largo del tiempo.

En este sentido, debe analizarse la adecuación de los diferentes materiales a las funciones estructurales específicas que le van a ser exigidas durante su vida útil.

Cuando se dispongan en la estructura del dique dos materiales contiguos provenientes de fuentes de suministro distintos y con diferentes características, deberá evaluarse la compatibilidad entre ellas.

B.3.1 Consideraciones económicas

De acuerdo con la ROM 1.1 ha de plantearse la evaluación del coste a lo largo de la toda la vida útil de la estructura, teniendo en cuenta el coste de construcción pero también el de las fases de explotación (conservación y reparación) y, en su caso, desmantelamiento.

En el proceso de diseño debe tenerse en cuenta la complejidad constructiva en la potencial reparación de algunos elementos del dique, teniendo en cuenta la posible clausura y restauración de canteras que puede poner en riesgo la disponibilidad de materiales para la reparación.

La potencial reutilización del material constituyente al final de la vida útil cuando se trata de diques de abrigo es una opción que ha de ser considerarse en todo caso, a pesar de ser poco habitual en diques de abrigo.

Por lo general, la fase que supone un considerable mayor coste es la de construcción (disponibilidad de material + puesta en obra), salvo que proyecto del dique se base en frecuentes reparaciones.

El coste de explotación de una cantera depende del volumen de producción. Las labores de clasificación, transportes intermedios y acopios suponen un porcentaje importante en dichos costes.

Por lo general, casi unas dos terceras partes del coste corresponden a movilización de la maquinaria.

De manera general, la distribución en los costes de maquinaria para las distintas fases del proceso de producción puede considerarse la siguiente:

- 20-30% para la retirada de montera, perforación y voladuras
- 30-40% para la clasificación y carga en el frente
- 20% para el transporte a acopio
- 10% para la clasificación y separación en acopio
- 10% para la carga previa al transporte

El factor principal que determina el coste de producción es el ajuste de la distribución de tamaños que se obtienen con las demandas específicas de la obra. Una gradación de proyecto que presente grandes discontinuidades y no se ajuste a la gradación producida inicialmente, requerirá de un tratamiento posterior que puede llegar a afectar significativamente al coste. Debe tenerse en cuenta que un aprovechamiento del 60-70% del total del material extraído puede considerarse un éxito.

En el caso de que se esté explotando una cantera propia para la obra y se requiera una sobremedición de un determinado tamaño de material por encima de la producción que le corresponde de acuerdo a la curva de distribución de dicha cantera, ese aumento supondrá a su vez un incremento en la producción de cantera del resto de tamaños, que deben ser considerados como sobrantes. En esos casos debe analizarse si, para la obtención de dicho volumen extra de un determinado tamaño, es más económico recurrir a canteras comerciales (Figura B.1).

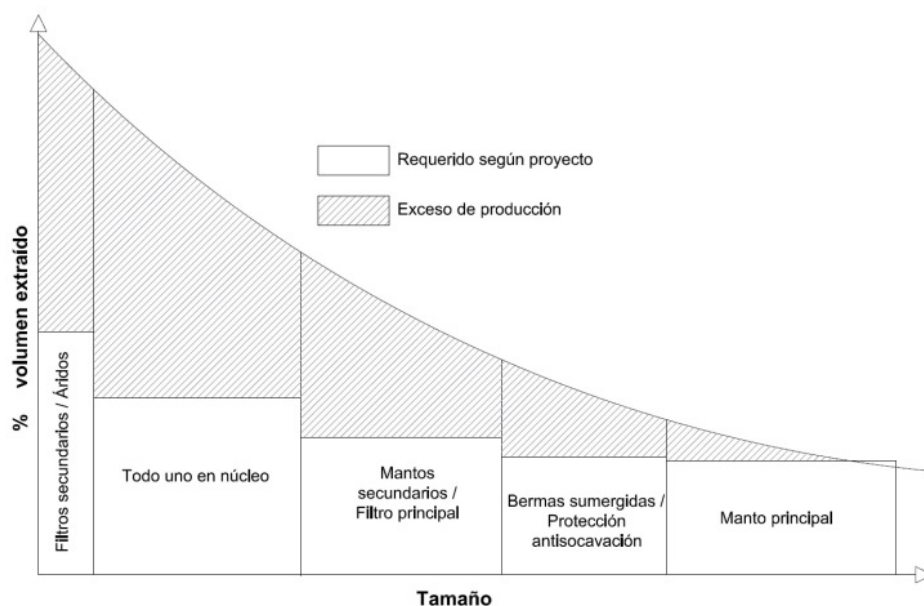


Figura B.1: Relación aproximada entre la producción y la utilización del material de cantera

Estos aspectos deben ser tenidos en cuenta en la fase de proyecto, pues diseños alternativos que impliquen un mejor ajuste a la curva de producción de la cantera pueden suponer importantes ahorros económicos. Por lo general, el ajuste viene condicionado por el volumen requerido para las escolleras de mayor tamaño.

Otros factores secundarios son el ajuste de los ritmos de producción a las necesidades de la obra, la necesidad de realizar movimientos y acopios intermedios en la cantera, necesidad de sucesivas movilizaciones y puestas en marcha de la explotación debido a un mal encaje con el programa de la obra, etc.

La clasificación de escolleras de más tamaño es más lenta que para los tamaños inferiores. Sin embargo para estos últimos el coste puede incrementarse mucho debido a las operaciones intermedias necesarias para los procesos de clasificación y acopio.

Debe evaluarse la necesidad y rentabilidad económica de la instalación de una planta de machaqueo y clasificación, o bien de otros equipos mecánicos de clasificación teniendo en cuenta su coste de instalación y conservación, ritmos de producción y valor residual al final de la obra.

Tipos de coste

- Costes fijos: están muy relacionados con el tipo de cantera y la explotación requerida. Incluyen: la apertura y cierre de canteras; movilizaciones y desmovilizaciones de equipos; accesos; estudios y campañas de caracterización.
- Costes variables:
 - Costes o tasas variables en función del tiempo: mantenimiento de la actividad de la explotación y de instalaciones fijas; conservación de accesos; inspecciones; monitorización.

- Costes o tasas variables en función de la calidad del material: investigaciones específicas; actuaciones y equipos auxiliares derivados de la calidad del material (excavaciones auxiliares, tratamiento de estabilización de bancos, elementos de seguridad adicional, etc.)
- Costes o tasas variables en función del volumen de material a poner en obra

El coste de total de material de cantera (escolleras) puede plantearse como:

$$C = Q(t)u(\text{€/t}) + n C_F + (n - x)C_0 \quad (\text{B.1})$$

donde Q es la producción necesaria, u el coste directo unitario de producción, n el número de días naturales, x el número de días de parada, C_F los costes fijos y C_0 los costes de operación.

Estimación del coste

La evaluación del coste debe centrarse sobre las unidades que suponen un mayor importe y sobre aquéllas que presentan unas mayores incertidumbres.

Suelen ser unidades de coste unitario reducido pero con una gran repercusión en el coste total de una obra debido a su elevada medición y, por tanto, de un elevado riesgo.

La estimación del coste debe llevarse a cabo en diferentes niveles y fases del proyecto, teniendo en cuenta las posibles incidencias más frecuentes. El nivel de incertidumbre va disminuyendo en las sucesivas revisiones de la estimación. Pueden realizarse análisis probabilísticos en los términos indicados en la presente ROM 1.1.

Las estimaciones de costes de construcción suelen ser más fiables que las de costes de conservación y reparación por las incertidumbres durante la vida útil, si bien la ROM 1.1 proporciona herramientas para abordar estas estimaciones en función de los criterios de actuación que se adopten en proyecto.

Deben tenerse en cuenta los factores específicos y particulares del emplazamiento que influyen en los costes.

La magnitud de coste es el peso, pues es medible en camiones o en gánguiles.

El coste de disponibilidad de material, de construcción y de conservación

Puede distinguirse entre los costes de disponibilidad del material, los costes constructivos propiamente dichos y los de conservación/reparación (y eventual desmantelamiento). No obstante, están fuertemente relacionados entre sí. Por lo tanto, incluyen los costes de producción, clasificación y acopios, transporte y puesta en obra.

La disponibilidad de materiales de cantera para su uso como escolleras para los volúmenes requeridos y a un coste razonable debe estar garantizada. Las incertidumbres inherentes a la estimación inicial del coste deben estar evaluadas.

En relación a esto, deben valorarse inicialmente los siguientes aspectos:

26 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

- Si existen canteras próximas a la obra susceptibles de ser empleadas por disponer de material adecuado (en calidad y durabilidad) y cubrir las puntas de producción máximas esperables (cantidad).
- Las estimaciones de coste de construcción y de conservación deben realizarse sobre la base de la calidad y durabilidad del material que realmente vaya a ser empleado en la construcción.
- Debe conocerse “a priori” si la cantera va ser explotada con medios propios o si el material va a proceder de canteras comerciales de la zona. Igualmente si existen las instalaciones adecuadas de clasificación y machaqueo en cantera o es necesaria su instalación en obra.
- Disponibilidad, para las canteras a emplear, de los correspondientes permisos medioambientales para su explotación en las condiciones que requiera la ejecución de la obra.
 - A este respecto deben tenerse en cuenta las puntas de producción previsibles en función de la planificación de la obra, las cuales no deben exceder los ritmos máximos definidos en los permisos ambientales en vigor.
- Ajuste adecuado entre los volúmenes requeridos para los diferentes tamaños de escolleras según proyecto y los que puedan extraerse mediante una explotación racional de la cantera, incluyendo los volúmenes pre-existentes acopiados y aptos para su uso. A este respecto deben tenerse en cuenta que los volúmenes deducidos a partir de los perfiles de los planos de las secciones definitivas no tienen en cuenta:
 - las pérdidas esperables en los procesos habituales de extracción, clasificación, transporte y puesta en obra
 - las penetraciones
 - los asentos
 - las socavaciones en fases provisionales
- De las consideraciones anteriores debiera garantizarse la disponibilidad de los volúmenes requeridos con un volumen de sobrantes mínimo. En este sentido, el proyectista debiera comprobar si las relaciones entre tamaños que se derivan de su diseño cumplen aproximadamente las relaciones entre los distintos tamaños para una explotación habitual y si, por tanto, los volúmenes sobrantes son razonables.
- Viabilidad y coste del transporte de la cantera a la obra: accesos, transporte vía terrestre o marítima, capacidades de los medios de transporte, horarios permitidos, condiciones ambientales.
- El coste de construcción depende también de los procedimientos y medios que se empleen. Conviene contemplar detalladamente el proceso constructivo en la fase del diseño del dique de acuerdo con la presente ROM 1.1, pues en algunos casos diseños que impliquen más volumen de material pueden resultar más económicos al simplificar los procesos y medios de construcción. Un ejemplo de esta circunstancia es la determinación de la anchura mínima del dique en coronación durante la fase constructiva para permitir el cruce de camiones y el posicionamiento de la grúa de colocación del manto a una cota suficientemente segura.

- Debe analizarse la complejidad de puesta en obra de los diferentes tipos de material. Diseños demasiado complejos pueden resultar antieconómicos, pudiendo ser susceptibles de alternativas optimizadas.
- El análisis del coste debe tener en cuenta los niveles de daño previsibles en función del riesgo asumible. Por ejemplo, un sobredimensionamiento de las piezas de manto puede no repercutir significativamente en el coste, pues supone un menor número de operaciones de colocación.
- Conviene hacer el análisis anterior igualmente para las fases constructivas provisionales, teniendo en cuenta la programación de la obra y los ritmos de suministro de materiales de cantera así como la disposición de sistemas de predicción de clima marítimo implantados en obra, estimación de pérdidas en caso de temporal, etc.

Durante la fase de servicio los costes están asociados a las labores de toma de perfiles (control de ejecución), evaluación del funcionamiento de la estructura y eventuales repuestos o reparaciones, y están íntimamente ligadas al diseño de la estructura.

Finalmente, debe tenerse en cuenta si la estructura o parte de ella debe ser desmantelada al final de la vida útil, siendo el material reutilizable o no.

B.3.2 Máximo tamaño posible

El tamaño máximo definido en proyecto es un parámetro crítico para la evaluación de la viabilidad de la solución. Un peso por encima de los máximos disponibles en las canteras de la zona puede poner en cuestión el diseño en su conjunto.

Como regla general, tamaños mayores que los que pueden obtenerse en canteras próximas a la obra en cantidad suficiente deben ser sustituidos por piezas prefabricadas. No obstante, puede haber excepciones a esta regla, resultando en ocasiones más conveniente el suministro de escolleras desde canteras lejanas.

De acuerdo a lo comentado en el apartado anterior, debe evaluarse igualmente si la obtención de los volúmenes requeridos en las canteras elegidas es a costa de una sobre-producción de materiales finos que supongan elevados sobrantes no aprovechables en la obra.

En ocasiones muy específicas, la inviabilidad de obtención de elevados pesos de escolleras obliga a adaptar el diseño: empleo de bermas, diques en talud dinámicamente estables, mayores espesores de capa o taludes más tendidos.

De manera general y como primera aproximación, debe tenerse en cuenta las proporciones de volúmenes indicadas en la tabla B.1 para distintos tipos de diques, según establece el Rock Manual (CIRIA, CUR, CETMEF. 2007).

El máximo tamaño de escollera que puede obtenerse en una determinada cantera con un aprovechamiento comercial depende de varios factores:

- Marco geológico / Naturaleza de la roca
- Presencia de fallas o líneas de discontinuidad estratigráfica generalizadas

28 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

Material	Dique con manto de doble capa (%)	Dique con manto de una sola capa (%)
Manto principal	10-30	5-15
Mantos secundarios y filtros	5-20	5-20
Bermas y protección anti-socavación	0-10	0-10
Núcleo	40-70	50-80

Tabla B.1: Proporciones de volúmenes relativos al total de la sección del dique (%)

- Grado de fracturación y microfracturación general del macizo rocoso
- Grado de meteorización

Las escolleras de mayores tamaños suelen ser empleadas:

- En diques en talud, como piezas:
 - del manto principal de protección
 - del filtro más externo en contacto directo con las piezas prefabricadas del manto exterior
 - de las bermas y pies de apoyo del manto principal
 - del manto interior
- En diques verticales, como piezas:
 - del manto de protección de los taludes exteriores de la banquetta
 - del filtro más externo en contacto directo con las piezas prefabricadas del manto exterior de la banquetta

En piezas grandes, la estimación de peso puede ser visual si el operador es experimentado y, especialmente, si cuenta con muestras patrón de los diferentes tamaños nominales a pie de tajo.

Las recomendaciones del Rock Manual para la obtención de tamaños grandes de escollera son las siguientes:

- Baja carga específica ($0.11-0.25 \text{ kg/m}^3$) y baja velocidad de detonación (m/s), siendo crítica la precisión en el barrenado
- La relación entre distancia entre barrenos y la piedra (distancia de la primera fila de barrenos al frente) ha de ser menor o igual a 1, siendo además la piedra mayor que la distancia entre discontinuidades del macizo rocoso
- Elegir correctamente la altura del banco, siendo recomendable de dos a tres veces el tamaño de la piedra
- Limitar el diámetro del barreno a menos de 100 mm

- La zona de la que se obtienen mayores cantos es la correspondiente a la zona superior del barreno (zona retacada). Por lo tanto conviene adoptar una longitud de retacado suficiente de acuerdo al tamaño de cantos a obtener
- Es preferible una sola fila de barrenos en lugar de varias. Además, es recomendable la detonación simultánea, pues los retardos provocan mayores vibraciones y nivel de fracturación
- Concentración elevada en la carga de fondo
- Cargas desacopladas a lo largo de la altura de barreno, y estratificada (con aire o áridos) para romper la continuidad

Por otra parte, en los casos en que las discontinuidades del macizo rocoso estén muy espaciadas, debe adaptarse la malla de barrenos y la carga para evitar la producción de piezas demasiado grandes. Además deberá tenerse en cuenta la capacidad de los medios de manejo de dichos bloques, así como la disminución en el rendimiento de carga y clasificación por parte de la maquinaria (excavadoras, palas cargadoras, ...) a medida que es mayor el porcentaje de piezas de gran tamaño que resultan en cada detonación. Por ejemplo, para piezas mayores de 500 kg la clasificación ha de ser individual pieza a pieza.

B.4 Funciones en la estructura y exposición

Una vez puesto en obra, al material proveniente de cantera se le exige que cumpla una serie de funciones, las cuales dependen del elemento del que formen parte.

De una manera global y con objeto de abarcar una generalidad de tipologías, las funciones principales típicas que pueden ser exigibles a estos materiales como partes constituyentes de una sección son: generación de volumen, filtro y resistencia a la acción del oleaje y corrientes.

Cada una de ellas, a su vez, puede tener un tipo de exposición diferente en relación con el nivel de mar, y así habrá que distinguir entre posición seca, sumergida y en carrera de marea. En cada una de ellas, las propiedades requeridas para el cumplimiento de las funciones que les son exigibles son diferentes.

B.4.1 Generación de volumen

Las mediciones que se deducen del proyecto (por perfiles o por modelos volumétricos digitales) dan como resultado el volumen teórico de proyecto. Por su parte, el volumen real del material puesto en obra se ve afectado por las porosidades de cada una de las capas o mantos donde se dispone. En este sentido, rangos habituales de porosidades de los materiales puestos en obra pueden considerarse (PIANC, 2008):

- Todo uno: 15-20 %
- Escollera: 35-40 %
- Media: 30-35 %

A este respecto debe tenerse en cuenta que el procedimiento de puesta en obra del material (además de otros factores) tiene una influencia significativa en las porosidades resultantes.

30 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

Para la estimación de los volúmenes de material en banco que deben ser explotados en cantera, deben añadirse las pérdidas producidas en los diversos procesos constructivos: voladura, clasificación, acopio, transporte, puesta en obra, penetraciones en los fondos y acción del mar y las corrientes en fases provisionales.

En obra se realiza el control volumétrico del material dispuesto realmente en las secciones correspondientes, de acuerdo al espaciamiento y a los tramos de verificación establecidos en el PPTP del proyecto, debiendo verificarse que se cumplen los criterios establecidos tanto en peso de las piezas como en densidades. Previamente a la ejecución de las unidades de obra se recomienda la realización de un tramo de pruebas en seco, que permita verificar las hipótesis de proyecto en cuanto a porosidades, densidades de puesta en obra y espesores de capa.

Debe llevarse un contraste regular entre el resultado de las mediciones del material puesto en obra frente a los volúmenes extraídos en banco y los volúmenes deducidos por el pesaje de los camiones (si el transporte es vía terrestre) o por el calado de los gánguiles (si es por vía marítima), y comprobar si las estimaciones asumidas (factor de esponjamiento, porcentajes de pérdidas del material a lo largo de las líneas de producción durante la construcción) pueden considerarse suficientemente fiables.

En el caso de que la obtención de los volúmenes requeridos de los distintos tipos de materiales sea demasiado costosa, el proyectista debe adaptar la geometría de algunas de sus partes o, incluso, plantearse diseños alternativos de las secciones tipo del dique.

Todo uno de cantera

El material a emplear como núcleo en los diques suele ser todo uno de cantera, al cual no se le exigen requisitos específicos más allá de:

- Limitación de tamaños máximos y por debajo de un determinado umbral (limitación en el contenido de finos y en los tamaños más gruesos, aptos para escolleras clasificadas)
- Propiedades:
 - Resistencia al corte
 - Porosidad
 - Permeabilidad

Existen diversas clases de todo uno para su uso en material de núcleo:

- Sin control granulométrico específico
- De machaqueo: controlando el tamaño máximo que pasa por la machacadora principal
- Todo uno que pasa por la carrilera: el principal problema es que no dispone de control de finos, con riesgo de retener una fracción arcillosa suficiente para alterar la resistencia al corte
- Cribado con retirada de finos (entendiendo en ocasiones por finos a los tamaños hasta 1 kg): este procedimiento es costoso y requiere un control especial, pero otorga una alta permeabilidad al material resultante

En general, la limitación del porcentaje de finos supone los siguientes efectos:

- Incremento de permeabilidad/porosidad, lo que se puede traducir en una mayor transmisión aunque redunde de forma positiva en la estabilidad hidráulica de los mantos exteriores
- Aumento en el porcentaje de estériles en la explotación de la cantera
- Mejora en las condiciones de estabilidad geotécnica por aumento de la resistencia al corte

No obstante debe evaluarse desde un punto de vista realista la eficacia de los procedimientos de eliminación de finos cuando se lleven a cabo.

En función de la decisión que se tome en cuanto a la retirada o no de finos, y la eficacia de las medidas al respecto, deberá estimarse la porosidad y, a partir de ahí, el volumen de cantera a explotar.

Materiales granulares alternativos

En algunas ocasiones pueden emplearse materiales alternativos no provenientes de canteras. Estos materiales se describen someramente a continuación, pero no forman parte del objeto del presente Anejo ni, en general, de los procesos que integran la ROM 1.1.

El origen de estos materiales puede ser variado pero normalmente pueden considerarse dos grupos: material proveniente del dragado (del tipo gravas) y materiales alternativos a partir de estériles de procesos industriales o de reciclado de otras estructuras.

En cualquiera de estos casos debe haber sido garantizado previamente la idoneidad ambiental de este tipo de materiales para su empleo. En este sentido, es conveniente documentar el comportamiento de este tipo de materiales en experiencias similares previas.

Posibles empleos de estos materiales pueden darse como núcleo de diques, filtros o protección de taludes o pies de manto.

Puede ser también necesario el confinamiento de estos materiales en láminas de geotextil, geomembranas u otras soluciones similares, incluso mediante el empleo de conglomerantes que impidan la fuga de finos (bituminosos o cementosos, limitando o eliminando el potencial de lixiviación). El empleo de estos conglomerantes puede impedir la salida de finos contaminantes bien al quedar atrapados en la matriz resultante, bien al reaccionar químicamente entre ambos. En todo caso, el empleo de estos métodos reduce la porosidad y dificulta la entrada y salida del agua al núcleo del dique.

Los propios procesos de selección de material deben incluir las medidas oportunas para la eliminación de las partículas que puedan resultar contaminantes, lo cual no difiere del caso de emplear materiales de cantera tradicionales.

Una relación posible de fuentes de suministro de materiales granulares alternativos es la siguiente (algunos como materiales granulares, otros como aglomerantes):

- Materiales procedentes del dragado
- Materiales de desechos de construcción y demoliciones. Hormigón reciclado

32 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

- Residuos de incineradoras urbanas
- Neumáticos usados
- Escorias de altos hornos
- Arenas de fundición
- Residuos mineros
- Cenizas volantes
- Fosfoyesos

Poco puede decirse de manera general sobre las propiedades mecánicas de estos materiales alternativos, pues dependen del proceso que se haya adoptado para su obtención. No obstante, puede decirse que las texturas equivalentes varían en el rango de las arenas a las gravas.

Previamente al empleo de materiales alternativos debe evaluarse el comportamiento frente a:

- Meteorización (debido a disgregación física, química o ambos tipos)
- Corrosión por cloruros
- Hinchamiento
- Acción del hielo y deshielo

En definitiva los riesgos asociados a las propiedades de los materiales estériles de procesos industriales y reciclados vienen recogidos en la Directiva 91/689/ECC.

Otras posibles soluciones alternativas bien para la generación de volumen o incluso con el objeto de obtener resistencia mecánica son:

- Gaviones
- Materiales granulares estabilizados con grout u otros aglomerantes
- Geotextiles y geomembranas

En todo caso, el empleo de materiales alternativos requiere su consideración específica en lo que se refiere a la afección a la validez de los procedimientos de verificación del diseño de los diques.

B.4.2 Filtro

Las capas de filtro se colocan entre los mantos de protección y los materiales de núcleo (o material base). El diseño de los filtros (o mantos secundarios) debe hacerse para permitir el paso de agua evitando la fuga de finos de los materiales del núcleo. Los filtros se tratan de manera específica en el Manual de la presente ROM 1.1 al que se remite este anejo.

De igual manera, cuando se dispone una capa de protección contra la socavación del fondo natural al pie del dique, o bien como capa de apoyo al pie del manto principal y en contacto directo

con el suelo (que haría las veces de material base en este caso), deben cumplirse las condiciones de filtro para evitar la fuga de las partículas finas del suelo.

Al modo de fallo por pérdida de finos (migración) a través de los poros de las capas de filtro se denomina “Inestabilidad de filtro”, debiendo distinguir tres tipos:

- Erosión interna: ocurre cuando, en filtros con granulometrías continuas, las partículas finas de la propia capa de filtro migran a través de los huecos que dejan los granos mayores
- Inestabilidad en la interfaz con filtros granulares: cuando migran los finos del núcleo (o del suelo) sobre el que apoya la capa de filtro a través de los huecos de la capa de filtro
- Inestabilidad en la interfaz con filtros geotextiles: idéntico al anterior, pero a través de los poros de la lámina de geotextil

B.4.3 Resistencia a la acción mecánica del oleaje y corrientes

Las escolleras que deben soportar la acción del oleaje y corrientes son las que se disponen en las siguientes partes de diques en talud, espigones y protecciones de ribera:

- Mantos exteriores
- Bermas de apoyo o pies de los mantos exteriores
- Bermas superiores del manto
- Mantos de protección de taludes interiores

O bien:

- En diques verticales, como mantos de protección de la banqueta de cimentación de la estructura de gravedad
- En muelles, como mantos de protección de la banqueta frente a la socavación producida por las hélices de los barcos
- En muelles de pilotes, como mantos de protección del talud frente a la socavación producida por las hélices de los barcos

Es evidente que el funcionamiento hidráulico de cada una de estas partes está influido por la tipología en particular de que se trate. Por ejemplo, al tratar de estructuras en talud, deberá considerarse si ésta es rebasable o no.

Para cada tipología y cada elemento de la estructura se cuenta con un conjunto de procedimientos de verificación particulares que permite definir el peso mínimo necesario para resistir la acción del oleaje y corrientes. Estos procedimientos consideran por lo general, entre sus variables de entrada, el nivel de daño admisible, definido de acuerdo con las bases de partida del proyecto según los procedimientos definidos en la ROM 1.1.

Para las fases constructivas del dique, se redactará un procedimiento de protección de la obra en ejecución coherente con los criterios de averías y reparación definidos en fase de proyecto para

34 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

hacer frente a los ciclos de sollicitación esperables. Los criterios de reparación deben definir los acopios necesarios en obra.

Para la protección contra la socavación producida por las hélices de los barcos deben emplearse sus procedimientos de verificación específicos. En algunos casos, en lugar de escolleras es conveniente el empleo de otras soluciones, como bolsas o mantas rellenas de grout, piezas prefabricadas, etc., debido a que proporcionan protección con un espesor menor.

En todo caso, las escolleras de manto de protección suelen disponerse en doble capa, con lo que el manto tendrá un espesor de $2 \cdot kt \cdot Dn50$, siendo kt un coeficiente que depende de la forma de las escolleras, de sus curvas granulométricas y del método de colocación.

En relación con la durabilidad de las escolleras a la acción del oleaje, además de las consideraciones incluidas en el apartado 6 de este Anejo, debe tenerse en cuenta que su empleo puede ser preferible al de piezas prefabricadas de hormigón cuando se requieren vidas útiles largas. Materiales provenientes de rocas de naturaleza ígnea y metamórfica y algunas calizas compactas presentan una absorción de agua muy baja, buena integridad y una gran dureza, características que los convierten en preferibles al empleo de piezas prefabricadas.

B.4.4 Posición: seca, sumergida y en carrera de marea

En los climas cálidos, la posición de la escollera en relación con el nivel del agua (posición seca, sumergida o en carrera de marea) influye en la susceptibilidad al deterioro por cristalización de sales.

En climas fríos, la escollera es susceptible de deterioro por las presiones inducidas por los ciclos de hielo-deshielo.

El primer fenómeno sucede a partir de la precipitación de sales producida por la sucesión de ciclos de mojado/secado en agua salada. Esta precipitación de sales provoca la aparición de esfuerzos cíclicos internos que puede afectar a la integridad de la escollera.

No obstante, esta susceptibilidad de la escollera a la descomposición por este mecanismo depende de otros factores además de su posición relativa: grado de alteración original de la roca madre por agentes atmosféricos, condiciones del clima, tipo petrográfico, procedimientos de extracción, presencia de minerales inestables, tamaños de los poros, abertura de las fisuras.

La severidad de los daños descritos anteriormente (debido a la cristalización de sales por los ciclos secado/mojado o a los ciclos hielo/deshielo) están relacionados con la frecuencia de dichos ciclos y con el clima:

- Daño por cristalización de sales: por el régimen de temperaturas, la humedad y salinidad del agua
- Daño por hielo/deshielo: por el régimen de temperaturas extremas, la humedad y el grado de saturación de la escollera

Para ambos mecanismos, la escollera es más susceptible al daño cuando se sitúa en zonas expuestas a una importante variación en el grado de saturación. Esta circunstancia se produce

B.4. Funciones en la estructura y exposición | 35

en la zona en carrera de marea y en las zonas afectadas por las salpicaduras.

En la tabla B.2 (extraída del Anexo C de la UNE-EN 13383) se muestra la severidad de las condiciones que produce la descomposición de la escollera en función del clima:

Zonas de exposición y condiciones	Clima	
	Mediterráneo*	Atlántico y continental
Zonas permanentemente sumergidas (incluye zonas en climas de hielo sumergidas por debajo de la posible profundidad de congelación)	Suave	Suave
Saturación parcial o completa con agua dulce	Suave	Severa
Saturación parcial o completa con agua salada	Suave	Severa

Tabla B.2: Zona de exposición y condiciones (Anexo C de la UNE EN 13383). *En la clasificación Mediterránea no es necesario considerar las condiciones de congelación, **Zonas con heladas

Por otra parte determinados tipos de roca tienen unos rangos de valores característicos de algunas de sus propiedades que permiten, para un experto, reconocer su susceptibilidad particular de alteración física o química a agentes externos. Un examen petrográfico y una adecuada clasificación del tipo de roca a menudo pueden permitir conocer la resistencia al deterioro frente a estos mecanismos. Del mismo modo que ciertos signos de alteración geológica pueden servir de base para suponer una baja resistencia a la alteración por agentes atmosféricos a medio y largo plazo.

En cuanto a los ensayos y requisitos exigidos a la escollera para asegurar la resistencia adecuada a estos mecanismos de deterioro (cristalización de sales, deterioro por ciclos hielo/deshielo), caben las siguientes posibilidades:

- Registro de servicios: cuando se dispone de experiencia de empleo de los materiales procedentes de fuentes homogéneas y similares a las que son objeto de estudio, y que han tenido un comportamiento satisfactorio a largo plazo en estructuras en servicio no suelen ser necesarios nuevos requisitos de ensayo.
- Examen petrográfico: de acuerdo al procedimiento especificado en la Norma UNE-EN 932.3, que proporciona información sobre los principales componentes mineralógicos de la roca, textura, porosidad, anisotropía y grado de alteración geológica. Escolleras con escasa resistencia a estos mecanismos de deterioro, derivadas de rocas muy meteorizadas o de algunos conglomerados, suelen contener algunos o varios de los siguientes elementos: esquistos, micaesquistos, filita, greda, marga, pizarra y rocas flojamente cementadas por minerales arcillosos.
- Ensayos de absorción de agua, congelación-descongelación y de sulfato de magnesio: si el examen petrográfico presenta resultados no concluyentes, es necesario considerar las tablas B.2 y B.3 para poder determinar qué nuevos ensayos son pertinentes.

Si la absorción de agua de acuerdo a la Norma EN 13383-2 no es mayor que el 0.5%, la escollera puede considerarse resistente al hielo-deshielo y a la cristalización de sales, y no se necesita ningún otro ensayo.

36 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

	Condiciones medioambientales	
	Suaves	Severas
Ensayo de hielo-deshielo (7.4) aplicable a las condiciones atlánticas y continentales*	Categoría NR	Categoría A
Ensayo de sulfato de magnesio (7.5) aplicable a las condiciones mediterráneas**	Categoría NR	Categoría A

Tabla B.3: Condiciones medioambientales (Anexo C de la UNE EN 13383). *Sólo zonas con heladas, **La clasificación mediterránea implica que no necesitan considerarse las condiciones heladas

Sin embargo, algunas escolleras pueden ser adecuadas incluso teniendo valores de absorción bastante superiores a 0.5%. Estas escolleras deben evaluarse por el ensayo de heladicidad según Norma UNE-EN 13383-2:2002 o por el ensayo de sulfato de magnesio según Norma UNE-EN 1367-2, si bien para estos últimos casos los tamaños de las partículas sometidas a ensayo suelen influir, en gran medida, sobre los resultados. En caso de resultados de ensayos en casos límites, la resistencia de la escollera puede contrastarse con otros procedimientos:

- Empleo de clases granulométricas superiores y más amplias (p.e. 63 mm a 125 mm)
- Repetición del ensayo con sulfato sódico de acuerdo a la Norma EUNE-N 12370

Si la escollera está permanentemente sumergida, no debiera ser necesario ningún ensayo de calidad de la roca frente a la degradación por cristalización de sales o helada.

B.5 Propiedades

Las propiedades de la escollera se clasifican en:

- Propiedades intrínsecas, propias del macizo rocoso en la naturaleza.
- Propiedades consecuencia de la explotación de la cantera (procesos de voladura, clasificación, acopios intermedios y carga), transporte y acopio a pie de obra.
- Propiedades consecuencia de la puesta en obra, determinadas por los procedimientos de colocación.

Las propiedades intrínsecas se estudian mediante estudio geológico en campo y análisis químico, físico y mecánico. Las propiedades consecuencia de la explotación de cantera y puesta en obra han de asegurarse a partir del control de calidad y de ejecución.

Este conjunto de propiedades, que se definen progresivamente desde el estado natural de la roca hasta la finalización de la obra determinan su durabilidad y su capacidad de respuesta a los requisitos resistentes y funcionales del dique, que han de ser coherentes con el proceso de diseño seguido y sus bases de partida, tanto las explícitas como las implícitas en los procedimientos de verificación seguidos.

B.5.1 Propiedades intrínsecas

Densidad, absorción de agua y definiciones

Esquemáticamente la relación volumétrica de una muestra de roca puede representarse de manera expuesta en la figura B.2, donde se observa el cuerpo del esqueleto mineral (V_M), y los huecos (poros) que parcialmente estarán saturados con agua (V_w), denominándose al grado de saturación (S_r).

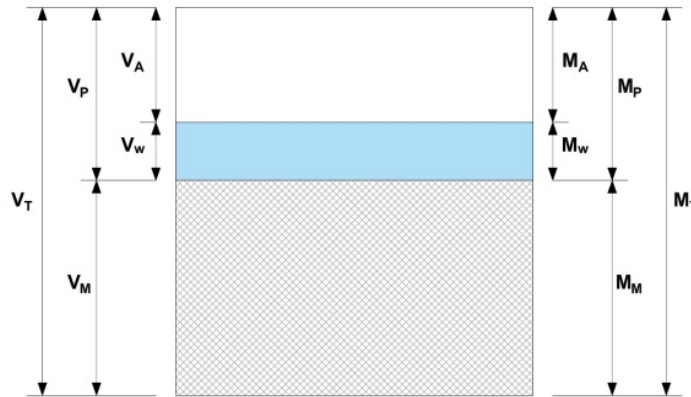


Figura B.2: Relaciones volumétricas de las muestras de roca

Inicialmente conviene definir con precisión los diferentes tipos de densidad (todas ellas pudiéndose medir en kg/m^3 ó en t/m^3), siendo la densidad aparente (ρ_{ap}) la magnitud que se emplea en el diseño (a introducir en las formulaciones).

La densidad real (ρ_{real}) está gobernada por la naturaleza petrográfica de la roca y no se emplea para el diseño.

La densidad aparente (ρ_{ap}) representa la relación entre la masa de una muestra y su volumen teniendo en cuenta la presencia de poros que, a su vez, pueden estar parcialmente saturados de agua. Es decir, aunque esté gobernada por la densidad real y el porcentaje de poros, también está influida por el grado de saturación. Por su parte, en la determinación de la densidad en ensayos en laboratorio (ρ_{roca}) la humedad es nula, no siendo ésta la humedad que debe ser tomada en cuenta en el diseño.

Por su parte, el coeficiente relativo de pesos específicos (adimensional) se define como:

$$\Delta = \frac{\rho_{ap}}{\rho_w} - 1 \quad (\text{B.2})$$

Este parámetro es el empleado habitualmente en muchas formulaciones de estabilidad hidráulica de las piezas de manto.

La porosidad de la roca, $p(-)$, es la relación entre el volumen de poros y el volumen total, $p = V_P/V_T$. No debe confundirse esta porosidad de la roca definida anteriormente con la porosidad

38 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

de un conjunto granular, como puede ser un manto de escolleras. Para este último caso y con objeto de evitar malentendidos nos referiremos a ella como nv.

La densidad de partículas de la escollera se debe determinar con el ensayo según UNE-EN 13383-2 apartado 8, a partir de la relación de masa a volumen de un componente de escollera o parte de la misma.

La absorción de agua (WA) de una roca es la relación entre la máxima masa de agua que puede absorber una roca con la masa seca del material:

$$WA = \frac{\rho_w}{\rho_{roca}} \cdot p \quad (B.3)$$

Ensayo según UNE-EN 13383-2 apartado 8. Se determina la absorción de agua pesando la porción de ensayo en la condición de secado superficial y saturación y de nuevo en la condición de secado en estufa.

El grado de saturación S_r es la relación entre el volumen de agua contenida en los poros del material y el volumen de poros total: $S_r = V_w/V_p$.

De donde resulta la siguiente relación:

$$\rho_{ap} = \rho_{roca} + \rho_w \cdot p \cdot S_r \quad (B.4)$$

El epígrafe “3.3.3.3. Degree of saturation in stability calculations” del Rock Manual (CIRIA y col., 2007) muestra la variación en la densidad aparente que hay que tener en cuenta para diversas porosidades y grados de saturación.

Este aspecto puede tener cierta importancia (sobre todo cuando se emplean rocas porosas) en el cálculo de la estabilidad de unas mismas escolleras dispuestas en distintas partes de la estructura (zonas intermareales o permanentemente sumergidas). Por lo general, puede asumirse un valor de $S_r = 0,25$ para escolleras que no están permanentemente en contacto con el agua, mientras que para las que están permanentemente sumergidas puede considerarse $S_r = 0,5$.

Por su parte en el epígrafe “3.5.2 Effect of rock density on design parameters” se analiza la influencia que la variación en la densidad de las escolleras puede tener en su estabilidad frente a la acción del oleaje.

La densidad de la roca está relacionada generalmente con el color de sus componentes mineralógicos (mayor peso a mayor oscuridad), disminuyendo con la porosidad y grado de meteorización.

Escolleras provenientes de una misma cantera pueden presentar densidades diferentes, siendo esta variación un buen indicador de la calidad del material a extraer. Variaciones grandes en una misma cantera pueden ser indicativas de presencia de distintos tipos de roca o de presencia de zonas con altos grados de meteorización.

Resistencia a compresión simple

La resistencia a compresión simple es uno de los indicadores principales para determinar la durabilidad de las escolleras, así como su potencial deterioro frente a roturas derivadas del manejo de las escolleras en las fases de producción, transporte y puesta en obra, o roturas producidas durante la fase de servicio.

Estas roturas pueden ser mayores (determinan la integridad de la escollera) o menores (están gobernadas por la resistencia a la rotura).

La integridad puede considerarse una propiedad esencial del tipo de roca.

Por su parte la resistencia a la rotura queda determinada, principalmente, mediante la resistencia a compresión simple (de acuerdo a la metodología de ensayo en el Anexo A de la Norma EN 1926:1999, el cual es muy similar a los ensayos convencionales de Resistencia a Compresión Simple, RCS). En el Capítulo 6 de este Anejo se muestran los rangos de valores recomendados, si bien de manera general puede resumirse que es recomendable alcanzar una resistencia de al menos 80 MPa para evitar excesivas roturas cuando se trata de escolleras de manto, y de 60 MPa cuando se trata de capas de filtro e intermedias.

Resistencia a carga puntual

La resistencia frente a cargas puntuales puede determinarse de manera sencilla mediante el ensayo de carga puntual (ISRM, 1985). Los resultados de estos ensayos deben ser posteriormente corregidos para obtener su equivalencia para testigos de 50 mm, expresando la resistencia mediante el índice I_s , que se relaciona de manera aceptable con el valor de la RCS mediante la relación $RCS \approx 2 \cdot I_s$ (EN 1926, Anejo B). Este ensayo, debido a su facilidad de ejecución, es recomendable para una rápida evaluación de la calidad del material de la cantera y como herramienta para el control de calidad en obra.

Por su parte, las pruebas de impacto Schmidt (ISRM, 1988) y de velocidad sónica (EN 14579:2004) son ensayos no destructivos que proporcionan información sobre la presencia de grietas.

Resistencia al desgaste

Las escolleras que por su tamaño pueden ser manejadas “a granel” (materiales de núcleo o de filtros con pesos menores de 300 kg), pueden sufrir un proceso de desgaste no sólo una vez puestas en obra, sino también en el propio proceso de producción hasta su puesta en obra.

La resistencia a la abrasión en fase de servicio es principalmente necesaria en aquellas escolleras que tengan que hacer frente a la acción erosiva del oleaje con arenas o gravas en suspensión o bien en secciones dinámicamente estables.

En ríos, canales y torrentes, o bien en zonas susceptibles de socavación por corrientes elevadas localizadas, la acción erosiva puede ser muy significativa y la resistencia a la abrasión de las escolleras debe estar garantizada.

La resistencia al desgaste se determina de acuerdo al capítulo de la Norma UNE-EN 1097-1:1996.

Patrón y distancia entre discontinuidades

El patrón de discontinuidades en una matriz rocosa en estado natural es uno de los factores que influyen en la distribución de tamaños de las escolleras que pueden obtenerse, así como en otras características básicas como su forma.

No sólo tiene importancia la distancia entre discontinuidades sino también la regularidad y el posición relativa entre los planos de fracturas (ortogonales o no).

Este patrón debe determinar el diseño de las voladuras (dimensionamiento de la malla).

La naturaleza de la roca determina los patrones habituales de espaciamientos de discontinuidades y la distribución de tamaños esperable. De manera general, cuando se trata de obtener escolleras para su empleo como piezas de manto:

- Una estratificación cuasi horizontal de rocas sedimentarias suele producir piezas de gran tamaño. Lo mismo puede decirse de rocas graníticas cuando presentan un conjunto regular de juntas sub-horizontales.
- El patrón de discontinuidad en rocas ígneas no suele ser tan regular.
- En rocas basálticas suelen aparecer juntas verticales, las cuales pueden dar lugar a la producción de bloques de gran tamaño si su espaciamiento está en consonancia con los tamaños requeridos.
- Igualmente suelen producirse bloques grandes cuando son apreciables discontinuidades bien definidas en rocas metamórficas (foliación) producidas por una alineación predominante en la distribución o segregación mineral (por ejemplo, en gneises).

Existen también en ciertos lugares canteras donde se producen escolleras de tamaño especial y forma casi cúbica, que son extraídas directamente mediante corte o mediante cuñas neumáticas.

En otros casos, una distribución irregular y muy poco ortogonal de las discontinuidades produce piezas grandes no susceptibles de otros usos. Habitualmente estos grandes bloques han de ser demolidos en la propia cantera para su manejo, siendo las piezas resultantes aptas para su empleo como material de manto de protección de diques.

En canteras de nueva explotación, con objeto de tener un adecuado conocimiento del patrón de discontinuidades del macizo y de las distribuciones esperables al respecto, conviene llevar a cabo un reconocimiento 3D, si bien hay otras técnicas indirectas que permiten identificar la posición de dichas discontinuidades y relacionarlos con la distribución de tamaños esperable: estudio de los porcentajes de testigos extraídos en sondeos, reconocimientos sísmicos y medidas de ondas sísmicas durante la perforación, etc.

En reconocimientos mediante sondeos, la orientación relativa de éstos respecto a los planos de las discontinuidades principales es crítica. Desde un punto de vista práctico los sondeos verticales son los únicos posibles. Debe planificarse esta campaña de reconocimiento determinando un número adecuado de sondeos, pues un sobre coste en esta fase suele conllevar importantes ahorros durante la explotación.

Palmström (2001) presenta un resumen de métodos para evaluar el grado de discontinuidades del macizo y su conversión en el volumen de bloques de escollera in situ, mientras que en la actualidad existen varios software que, a partir de la información obtenida en los reconocimientos iniciales descritos y mediante el empleo de diversos métodos estandarizados, proporcionan un mapeo 3D de las discontinuidades principales con un alto grado de fiabilidad.

B.5.2 Propiedades inducidas por la explotación de la cantera

Son las propiedades que se derivan de los procesos de voladura, clasificación, carga, transporte y acopios, tanto intermedios como finales.

Integridad de los cantos

Es la capacidad de que las piezas conserven su integridad como bloque. Viene definida por la resistencia a la rotura por discontinuidades o fisuras naturales o inducidas por los procesos de construcción, normalmente por la voladura. Es muy relevante en todas las escolleras, ya que el tamaño es determinante para casi todas las funciones que han de desempeñar las escolleras (mantos exteriores, capas de filtro...).

Se aborda en el Anexo B (informativo) a la UNE-EN 13383-1:2002.

Puede estudiarse de manera muy indirecta a través de ensayos de resistencia a compresión simple según UNE 1926, que no proporciona excesiva información. También pueden hacerse ensayos de rotura por caída (ensayo destructivo), aunque lo más frecuente es recurrir a la inspección visual, evidentemente subjetiva.

En Francia y los Países Bajos hay normalizados ensayos no destructivos.

Forma

La forma de los cantos tiene gran influencia en la estabilidad de los mantos sometidos a la acción del oleaje.

El criterio habitual es la relación longitud/espesor. Suele caracterizarse por el porcentaje de cantos que tiene una relación longitud/espesor mayor de 3. Se determina de acuerdo con el capítulo 7 de la UNE-EN 13383-2:2002.

A veces se evalúa la forma por otros parámetros: coeficiente de bloque, cubicidad, redondez, etc., que son mucho menos frecuentes.

Granulometría

La granulometría es una característica fundamental, que incide en:

- La porosidad de los mantos, relevante en la respuesta hidráulica y para el propio consumo de material
- La estabilidad interna de las capas y el cumplimiento de las condiciones de filtro con las adyacentes

Adicionalmente, las granulometrías excesivamente amplias presentan riesgo de segregación

42 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

del material durante la manipulación inherente a los procesos de carga, transporte, acopio y colocación.

Una correcta definición de las granulometrías, aseguradas las condiciones de filtro y la estabilidad interna, es fundamental para la explotación racional de la cantera y la evitación de sobrantes que se traducen en sobrecoste de explotación. Granulometrías muy estrechas implican mayor coste de clasificación y mayores volúmenes de estériles.

El CIRIA y col. (2007) clasifica las granulometrías de escollera como se muestra en la tabla B.4.

	D_{85}/D_{15}
Granulometría estrecha	< 1,5
Granulometría ancha	1.5 a 2.5
Granulometría muy ancha (todo uno)	2.5 a 10

Tabla B.4: Clasificación de las granulometrías de escollera

De acuerdo con el Anejo A de la UNE-EN 13383-1:2002 (informativo) los tamaños de referencia que se determinan a nivel normativo son:

- ELL: límite inferior extremo
- NLL: límite inferior nominal a
- NUL: límite superior nominal b
- EUL: límite superior extremo

Por debajo del ELL queda lo que se denomina “fragmentos”.

La norma UNE-EN 13383-1:2002, que no se aplica a granulometría amplia (todo uno para núcleo), sino sólo a escollera clasificada (Figura B.3).

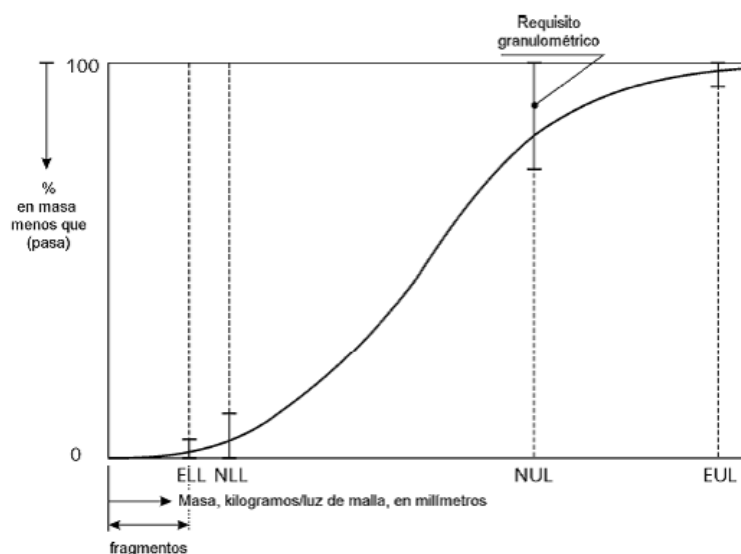


Figura B.3: Tamaños de referencia de granulometría EN-UNE 13383-1:2002

La Norma define tres tipos de escollera (Tabla B.5).

Tipo	Designación	Límites
Gruesa (escollera fina)	a a b (mm)	45 a 250 mm
Ligera (escollera media)	a a b (kg)	5 a 300 kg
Pesada (escollera gruesa)	a a b (kg)	300 a 15000 kg

Tabla B.5: Tipos de escollera

Dentro de estos tipos define un conjunto de distribuciones de tamaños normalizadas basadas en los límites antes expuestos (Tabla B.6).

	Escollera gruesa	Escollera ligera y pesada
ELL	5 %	5 %
LNL	15 % o 20 %	10 %
NUL	80 % o 90 %	70 %
EUL	98 %	97 %

Tabla B.6: Distribuciones de tamaños normalizadas

Adicionalmente, en el caso de escolleras ligeras y pesadas se distinguen las granulometrías normalizadas “A” y las “B”, las primeras de las cuales cuentan con intervalo normalizado para la masa media. Estas son las que se han de emplear en los mantos exteriores de los diques de abrigo, por su correspondencia con el resultado del diseño.

- Las granulometrías gruesas normalizadas corresponden a los tamaños 45/125 mm, 63/180 mm, 90/250 mm, 45/180 mm y 90/180 mm

44 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

- Las escolleras ligeras normalizadas corresponden a los intervalos de masa: 5 a 40 kg, 10 a 60 kg, 40 a 200 kg, 60 a 300 kg y 15 a 300 kg
- Las escolleras pesadas normalizadas corresponden a los intervalos de masa: 300 a 1000 kg, 1000 a 3000 kg, 3000 a 6000 kg, 6000 a 10000 kg y 10000 a 15000 kg

Se pueden definir husos granulométricos no normalizados siguiendo criterios análogos a los de los normalizados. En CIRIA y col., 2007 se muestran criterios para ello a partir de la masa media.

Materiales para el núcleo

El núcleo no tiene de por sí requerimientos específicos en cuanto a su tamaño medio M50, si bien su granulometría ha de asegurar su estabilidad interna. Su función esencial es “ocupar volumen”, siendo sus propiedades fundamentales:

- La resistencia al corte, caracterizada por su ángulo de rozamiento interno ϕ' .
- Porosidad
- Permeabilidad

La porosidad y permeabilidad son fundamentales desde el punto de vista del diseño del dique. Determinan la capacidad de disipación de sobrepresiones intersticiales del oleaje en el cuerpo del dique, que tiene influencia en su estabilidad geotécnica.

Interviene de manera fundamental en el balance entre los fenómenos que disipan la energía del oleaje: fricción turbulenta en el manto principal, reflexión, disipación en el cuerpo del dique y rebase. Resultan determinantes en la transmisión si el dique es muy permeable, y en la estabilidad del manto principal ya que si el núcleo es poco permeable y poco poroso reflejará parte de la energía del oleaje, con un efecto negativo en la estabilidad del manto principal.

Desde este punto de vista es fundamental que la especificación, y la posterior construcción del núcleo, estén de acuerdo con las bases, tanto explícitas como implícitas, de los procedimientos de verificación empleados en el diseño.

Materiales para la banqueta de cimentación de diques verticales y mixtos

Los materiales de banqueta de cimentación de diques verticales se protegen del oleaje mediante mantos exteriores de escollera a los que han de exigirse las mismas características que a las escolleras del manto principal de los diques en talud cuando están permanentemente sumergidas.

Entre la propia banqueta y las capas exteriores se han de cumplir las condiciones de filtro.

En cuanto a los husos granulométricos puede emplearse todo uno de cantera o bien escolleras clasificadas de huso estrecho y tamaño máximo limitado. En la parte superior la masa media de los cantos no debe superar los 50 kg para permitir su enrase con grava o balasto.

Las propiedades relevantes son:

- La resistencia al corte, caracterizada por su ángulo de rozamiento interno ϕ' .

- Porosidad
- Permeabilidad

Como las presiones de contacto del dique con la banqueta de cimentación pueden ser relativamente elevadas, la ROM 0.5-05 establece resistencia a compresión mínima de la roca en función de la presión de pico sobre el cimiento.

La porosidad y permeabilidad tienen gran influencia en las fuerzas del oleaje sobre la propia banqueta por percolación, y en la subpresión dinámica sobre la base del dique.

Los procedimientos de verificación suelen suponer que la distribución de presiones en la base sigue una ley triangular a partir de un valor de pico en el vértice exterior del cajón, anulándose en el lado más abrigado. En que la distribución de presiones se aproxime a la teórica o se aparte de ella influye:

- Posibles variaciones locales en la distribución granulométrica del material de banqueta.
- Acabado irregular del enrase que deje huecos entre cajón y banqueta.
- Turbulencia y concentración del flujo en las esquinas del cajón

B.5.3 Propiedades inducidas por la puesta en obra

Las propiedades asociadas al proceso de puesta en obra están determinadas de manera explícita o implícita en los procedimientos de cálculo y en el diseño de la solución en fase de proyecto. Estas propiedades son:

- Densidad, porosidad y espesor real de capa
- Trabazón entre los cantos
- Ángulo de rozamiento interno

De manera que la definición de los procedimientos de puesta en obra de estos materiales debe basarse en un buen conocimiento del proyecto y de las bases donde se apoyan los cálculos y el diseño.

Porosidad y espesor de capa

El volumen total de material a ser puesto en obra depende de las secciones constructivas pero también de la porosidad resultante de los distintos materiales una vez conformadas dichas secciones. De manera habitual, el proyecto obtiene las mediciones de los distintos materiales a partir del volumen obtenido de los distintos perfiles, facilitando así una medición por volúmenes y no por pesos.

Por otra parte, la porosidad depende del procedimiento de puesta en obra, así como del espesor de diseño de las capas en cuestión. De manera general, el espesor de diseño de una determinada capa está definido en función del valor de D_{n50} de la curva granulométrica del material.

La estabilidad hidráulica de las diversas capas depende de la densidad del propio material, pero también de la porosidad de la capa resultante en función de su puesta en obra, del volumen

46 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

de huecos que pueden ser rellenados por otros materiales más finos, de la forma de las piezas y de su rugosidad entre ellas (además, claro está, de la pendiente del talud resultante).

Así, cuando el objetivo de un manto de protección sea conseguir la estabilidad a la acción del oleaje o las corrientes, las piezas deben colocarse de manera que se consiga cierta porosidad y evitando un acabado plano, es decir, “sin carear”, de forma coherente con los procedimientos seguidos para la verificación.

Principalmente pueden considerarse los siguientes procedimientos de colocación:

- Aleatoria
- Estándar
- Densa
- Especial

La puesta en obra mediante vertido directo puede considerarse como colocación aleatoria.

La densidad resultante (densidad bruta o densidad aparente, ρ_b) de un manto de protección puede establecerse como:

$$\rho_b = (1 - n_v) \cdot \rho_{ap} \quad (\text{B.5})$$

siendo n_v la porosidad de la capa. De manera similar, la relación entre el volumen de roca (V_r) y el volumen bruto (volumen bruto, V_b) de la correspondiente capa es:

$$V_r = (1 - p) \cdot V_b \quad (\text{B.6})$$

El espesor teórico (t_d) se expresa como:

$$t_d = n \cdot k_t \cdot D_{n50} \quad (\text{B.7})$$

donde k_t es el coeficiente de capa y n el número de capas.

Y finalmente el número total de piezas puede estimarse de la siguiente forma:

$$N_a = n \cdot A \cdot k_t \cdot (1 - n_v) \cdot D_{n50}^2 \quad (\text{B.8})$$

No obstante todo lo anterior, debe tenerse en cuenta que el término porosidad de capa (n_v), debe considerarse limitada a tramos relativamente homogéneos en cuanto a las condiciones de contorno. En zonas de transición, cambios de alineación o en otros lugares singulares donde se requiera un cambio en el procedimiento de colocación, el valor de n_v puede cambiar.

Así pues, una adecuada estimación de la porosidad de capa es necesaria para llevar a cabo:

- La estimación de volumen de roca requerido
- La comprobación de que se encuentra en el rango previsto en los procedimientos de verificación de la estabilidad hidráulica del manto

Se ha comprobado la existencia de diferencias significativas tanto para los valores de k_t como de n_v en función de las siguientes variables principales:

- Procedimiento de colocación (aleatoria, especial, etc.)
- Forma de las escolleras, descritas mediante:
 - el coeficiente de forma BL_c , que es la relación entre el volumen de material de una pieza y el volumen total del paralelepípedo mínimo que puede englobarlo
 - aspecto o relación entre longitud y anchura de las piezas, LT
- Distribución granulométrica

Algunos rangos de valores para escolleras en manto recomendados por el CIRIA y col. (2007) se resumen en la tabla B.7, en las cuales en todos los casos se considera un valor de $LT=2.0$.

Número de capas	Tipo de colocación	Parámetro	Bloque regular ($BL_c = 0,65$)	Bloque irregular ($BL_c = 0,5$)
Una capa	Densa	k_t	0.84-0.89	0.77-0.82
		$n_v(\%)$	32-36	35-40
Doble capa	Estándar	k_t	0.91-0.96	0.87-0.92
		$n_v(\%)$	32-36	35-40
Doble capa	Densa	k_t	0.91-0.96	0.87-0.92
		$n_v(\%)$	31-35	32-36

Tabla B.7: Rangos de valores para escolleras. Los distintos valores dentro de un mismo rango son debidos al procedimiento de inspección

Se recomienda que todo diseño que se sustente en ensayos en modelo físico, traten de reproducir en la medida de lo posible las anteriores variables, principalmente el procedimiento de colocación y la forma de las escolleras.

El CIRIA y col. (2007) presenta algunos métodos gráficos o simplificados para la estimación de los parámetros k_t y n_v para ciertos casos.

Las tolerancias de colocación deben venir definida en el PPTP del Proyecto. En cada tramo de avance deben realizarse las comprobaciones geométricas correspondientes mediante perfiles transversales después de terminar cada una de las capas y antes de iniciar la colocación de la siguiente. La tolerancia en las capas de escolleras se sitúa alrededor de $\pm 0,5$ veces la longitud de la diagonal de la cara del cubo equivalente, si bien ello constituye una simplificación ya que la tolerancia debe establecerse en función de:

- Tamaño de las piezas
- Forma de colocación (a granel o pieza a pieza)

48 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

■ Profundidad de colocación

El CIRIA y col. (2007) proporciona un cuadro de tolerancias indicativas para la colocación de materiales de cantera.

Es norma de buena práctica, una vez concluido un tramo de dique, colocar hitos y referenciarlos topográficamente, así como realizar un reportaje fotográfico, con el fin de controlar los movimientos de las piezas de manto que pueden producirse tras los temporales.

Por su parte, la colocación de las capas subyacentes de filtro requiere una mayor precisión. En función de la profundidad del dique caben diversas alternativas para su ejecución, siendo los dos procedimientos más comunes:

- Vertido directo con perfilado posterior, el cual puede realizarse con retroexcavadora para diques poco profundos (Figura B.4), o bien con un prolongador acoplado al brazo de la retro
- Colocación con grúa y bandeja



Figura B.4: Perfilado de manto de escollera con retroexcavador

Rugosidad y trabazón

La densidad de capa resultante, bien sea para un filtro o un manto de protección, está directamente relacionada con la porosidad y, conjuntamente con las formas de las piezas y su distribución granulométrica, determina la trabazón entre partículas y, por lo tanto, la resistencia al corte de la capa así como de la interfaz con otras capas.

En el caso de los filtros, el empleo de escolleras suficientemente grandes (además de proporcionar una mayor permeabilidad y, por tanto, estabilidad a la capa de manto) presentan la ventaja de proporcionar una superficie de contacto con la capa de manto más rugosa, lo cual puede ser especialmente beneficioso si dicho manto se compone de piezas artificiales de hormigón.

En el caso de los mantos principales, su diseño asume una trabazón mínima entre sus elementos, la cual debe estar garantizada en función de:

- Unas determinadas condiciones de la escollera:
 - Relacionadas con su distribución granulométrica
 - Relacionadas con el valor de su factor de forma y del parámetro LT
- La precisión requerida en la colocación

La porosidad, la densidad aparente y la trabazón forman frecuentemente parte de las bases de partida implícitas en los procedimientos de verificación.

Garantizar una mayor trabazón entre las piezas de una capa puede ser una adecuada estrategia para garantizar la estabilidad mínima para aquellas escolleras en las que pueda haber dudas de su durabilidad por disponer de escasa resistencia al desgaste. Hay que recordar que la durabilidad de unas escolleras está relacionada, fundamentalmente, con su capacidad para mantener la masa de sus piezas individuales y la capacidad de encaje entre ellas a lo largo del tiempo.

Un mayor valor del factor de forma (BLc) implica una mayor facilidad de conseguir interfaces subparalelas, una mayor densidad de capa, un mayor número de puntos de contacto entre piezas y, por tanto, una mayor rugosidad y trabazón.

Por otra parte, limitar la proporción de piezas con valor de LT >3,0 (es decir, piezas alargadas o “escamas”) es una buena manera de asegurar una razonable trabazón, además de ser una buena práctica para reducir el porcentaje de piezas dañadas durante su manipulación previa a su puesta en obra.

En los casos en que se empleen bolos o cantos rodados, es necesario definir el porcentaje de caras rotas con objeto de asegurar un encaje mecánico adecuado.

Respecto a la colocación, un método de puesta en obra cuidadosa (no aleatoria) y el empleo de pinzas especiales puede ser beneficioso para mejorar la trabazón de escolleras de gran tamaño. No obstante estos criterios dependen de la destreza del gruista, factor muy difícil de controlar y prever. Por lo tanto, para asegurar una correcta trabazón resulta más adecuado garantizar unas determinadas condiciones de granulometría y forma de las escolleras.

En localización donde la obra pueda estar sometida a la acción del hielo, la trabazón entre piezas es fundamental para asegurar una estabilidad frente a cuñas de deslizamiento locales en aquellas zonas específicas del talud sometidas a la acción del hielo. Estos fenómenos requieren métodos de análisis particulares al ser modos de fallo muy específicos.

Finalmente debe tenerse en cuenta que las anteriores consideraciones hacen referencia a la trabazón en capas de escollera natural (filtros o mantos), las cuales se disponen en doble capa. El empleo de piezas artificiales de hormigón está sujeto a otras consideraciones específicas de cada tipo de bloque, así como su empleo en monocapa o doble capa.

B.6 Durabilidad

Se entiende por durabilidad la capacidad del material para continuar comportándose de forma adecuada en un ambiente específico.

La durabilidad se cuantifica por la pérdida de capacidad de respuesta a lo largo del tiempo que conduce a la superación de Estados Límite Últimos y/o de Servicio.

La durabilidad es función de:

- La composición mineralógica de la matriz rocosa
- La resistencia del material
- La agresividad de los agentes (físicos, químicos o ambientales) en fase de servicio, la cual a su vez depende de la ubicación en la que se encuentre en la sección

Al igual que las propiedades resistentes y de funcionalidad, la durabilidad de las escolleras depende de sus propiedades:

- Intrínsecas
- Resultantes de la producción en cantera
- Inducidas por el proceso de puesta en obra

Desde el punto de vista de los requisitos exigibles a las escolleras en cuanto a su durabilidad conviene tener en cuenta la ubicación en la que se encuentra dentro de la sección. Igualmente los requisitos exigibles a las escolleras pueden ser muy diferentes en función de la agresividad del medio en el que se encuentren.

Así en diques sometidos a la acción del oleaje:

- Las zonas más vulnerables son las que están en carrera de marea en secciones dinámicamente estables a la acción del oleaje.
- Zonas permanentemente sumergidas con reducidos flujos de agua a través suyo presentan tasas de degradación muy bajas o insignificantes. Una excepción a esto puede darse en aguas con un pH sustancialmente más ácido que el del agua de mar, que pueden provocar disolución de los carbonatos de la escollera y asientos del conjunto.
- Las escolleras del manto principal son las que pueden estar sometidas a procesos de meteorización por ciclos seco-mojado, cristalización de sales, ciclos de hielo-deshielo y oscilaciones térmicas.
- Las escolleras de filtro y núcleo deben ser física y químicamente estables:
 - Las escolleras de filtro tienen menor riesgo de meteorización que los mantos. La durabilidad de estas escolleras está relacionada casi exclusivamente con la permanencia de las condiciones de filtro de estas capas.

- El núcleo es la zona menos crítica. No obstante, principalmente en zonas de agua dulce, debe estar exento de sales solubles cuya disolución, además de afectar al mantenimiento del volumen de la sección, puede dañar el medioambiente.

B.6.1 Cualidades de durabilidad de las rocas: evaluación cualitativa

Los requisitos en cuanto a durabilidad que son exigibles a las escolleras y que sirven de base a su evaluación son los siguientes:

- Absorción de agua: de acuerdo a la tabla 12 de la UNE-EN 13383-1, si la absorción de agua es menor que el 0.5 % en masa, la escollera puede considerarse resistente al hielo-deshielo y a la cristalización de sales. No obstante, valores hasta 1 % pueden denotar igualmente buena durabilidad. Si presenta absorción de agua mayor, deberá determinarse su estructura de poros mediante los ensayos específicos.
- Resistencia a los ciclos hielo-deshielo: a determinar de acuerdo al Capítulo 9 de la Norma UNE-EN 13383-2:2002 y al Anexo C UNE-EN 13383-1:2002.
- Resistencia a la cristalización de sales: a determinar de acuerdo al Capítulo 8 de la Norma UNE-EN 13383-2:1998 y al Anexo C UNE-EN 13383-1:2002.
- Presencia de signos de Sonnenbrand: en la escollera de origen volcánico, de acuerdo al Capítulo 10 de la Norma UNE-EN 13383-2:2002.

Además de los anteriores, materiales procedentes de procesos siderúrgicos de alto horno y de acería contienen componentes específicos que afectan a la durabilidad y deben ser evaluados.

Los ensayos a realizar en relación con la determinación de los parámetros que evalúan la durabilidad y otros ensayos de meteorización acelerada están descritos en la Norma UNE-EN 13383-2:2002 así como en el epígrafe “3.8.6. Durability and accelerated weathering tests” de “The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd Edition)” (CIRIA y col., 2007).

En general, pueden considerarse indicadores de baja durabilidad aquellas escolleras que:

- De cuyo examen petrográfico se deduzca que se trata de:
 - Rocas meteorizadas, brechas o conglomerados
 - Esquistos, filitas, cretas y margas
 - Escollera con contenido de arcillas u otros materiales cementantes
 - Basaltos jóvenes (susceptibles de presentar efecto Sonnenbrand)
 - Piritas
- Tengan una baja densidad que denota una baja durabilidad debido principalmente a su alta porosidad. La norma europea EN 13383 especifica una densidad mayor que 2.30 t/m³ para asegurar una mínima durabilidad. Escolleras con densidades por debajo de este valor no deben emplearse en obras nacionales.

El Rock Manual presenta en su Tabla 3.12 (Figuras B.5 y B.6) una evaluación de la calidad del material en base a la siguiente clasificación:

52 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

- Excelente: comportamiento ideal, sin riesgo de degradación.
- Buena – calidad mayor que la media: no son necesarias medidas específicas en situaciones normales, presentando tasas de degradación habituales a lo largo de la vida útil
- Marginal – calidad menor que la media: sin medidas específicas, son esperables tasas de degradación significativas, por lo que los procesos de diseño, producción, construcción y conservación deben adaptarse a este hecho.
- Pobre (mala) – calidad mucho menor que la media: debe evitarse el empleo de estos materiales en la medida de lo posible cuando la clase de la exposición en la que se encuentre pueda suponer una rápida degradación de sus capacidades. En todo caso, son necesarias medidas intensivas de conservación a lo largo de su vida útil.

La tabla proporciona directrices para la evaluación cualitativa de los materiales que provengan de una cantera y permite obtener valoraciones cuantitativas para ser empleadas con fines de comparación entre distintas fuentes o como datos de entrada de modelos de degradación de propiedades.

En todo caso la información de la tabla no debe ser tenida en cuenta a efectos de establecer especificaciones.

Se trata de una guía que puede ser adaptada en el número de categorías de acuerdo a los niveles de control a implantar en la explotación de la cantera.

A los efectos de la presente ROM 1.1 los criterios para una evaluación preliminar del material, con carácter fundamentalmente orientativo y no como base rigurosa para especificaciones pueden resumirse en las figuras B.5 y B.6.

Indicadores habituales de calidad y durabilidad					
Criterio	Referencia	Valoración			
		Excelente	Bueno	Marginal	Mala
Clasificación litológica	EN 932-3	Rocas ígneas y metamórficas sanas, cuarcitas y areniscas silíceas muy cementadas, calizas compactas	Dolomías, calizas poco compactas y areniscas moderadamente cementadas	Calizas arcillosas, areniscas poco cementadas, dolomías de arrecife con oquedades	Calizas esquistosas, brechas de arrecife, esquistos, limonitas, pizarras, tizas, carbonatos de yeso
Estado tensional in situ de la matriz rocosa	Lienhart (1998)	Tensiones bajas, sin presencia de pliegues ni fallas	Tensiones medias, posible presencia de pliegues	Tensiones elevadas, con posible presencia de fracturas paralelas a la superficie	Estado tensional muy elevado. Posible presencia de fallas en superficie. Posible presencia de detritus en el suelo
Grado de meteorización	BS 5930:1999	IA – Sana, no meteorizada	IB – Débilmente meteorizada (marcas visibles en superficie)	II – Ligeramente meteorizada (descomposición extendida a una parte relevante del macizo)	III – Moderadamente meteorizada (menos de la mitad del macizo se encuentra descompuesto)
Discontinuidades (IBSD)	Wang et al (1990)	$D_{i80} > 2m$ *	$D_{i80} = 1,5 - 2,0 m$ *	$D_{i80} = 1,0 - 1,5m$ *	$D_{i80} < 1,0 m$ *
Forma y grado de meteorización	Lienhart (1998)	Menos del 5% de las escolleras con $LT > 3$. 95% de las escolleras con Grado IA, libre de cavidades y de extremadamente alta resistencia	5-10% de las escolleras con $LT > 3$. 95% de las escolleras con Grado IB o mejor, denso, muy alta resistencia	10-15% de las escolleras con $LT > 3$. 95% de las escolleras son al menos Grado II, bien con micro poros o con cavidades no rellenas. Alta resistencia	Más del 15% de las escolleras con $LT > 3$. 95% de las escolleras son al menos Grado III, arcillosos o micáceos
Análisis visual de la integridad	Lienhart (1998)	Tras dos meses en acopio, más del 95% de las escolleras están libres de fracturas incipientes, defectos o grietas debidas a liberación de tensiones, por manipulación o por exceso de voladuras.	90-95% de las escolleras están libres de fracturas tras dos meses en acopio	85-90% de las escolleras están libres de fracturas tras dos meses en acopio	Menos del 85% de las escolleras están libres de fracturas tras dos meses en acopio
Integridad del bloque (ensayo de caída)	CIRIA – Rock Manual. Sección 3.8.5.	$I_{M50} < 2\%$ $B_n < 5\%$ **	$I_{M50} = 2-5\%$ $B_n = 5-10\%$ **	$I_{M50} = 5-15\%$ $B_n = 10-35\%$ **	$I_{M50} > 15\%$ $B_n > 35\%$ **
Integridad del bloque (velocidad sónica: I_c y D_f)	Tourent et al (1971)	$I_c > 80$ $D_f < 20$	$I_c = 70 - 80$ $D_f < 20$	$I_c = 50 - 70$ $D_f < 20$	$I_c < 50$ $D_f \geq 20$
Densidad, ρ_{roca} (t/m^3)	EN 13383-2:2002	$> 2,7$	$2,5 - 2,7$	$2,3 - 2,5$	$< 2,3$

Figura B.5: Indicadores habituales de calidad y durabilidad. *Di80: tamaño del bloque in situ correspondiente al pasante del 80 %. ** Bn: índice de rotura, puede ser estimado visualmente. Se calcula como el número de piezas con pérdidas de masa mayores del 10 % en relación con el número totales de piezas de la muestra.

54 | Anejo B. Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo

Indicadores habituales de calidad y durabilidad					
Criterio	Referencia	Valoración			
		Excelente	Bueno	Marginal	Mala
Absorción de agua (%)***	EN 13383-2:2002	< 0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,0	> 6,0
Resistencia a compresión (MPa)	EN 1926:1999	> 120	80 - 120	60 - 80	< 60
Índice de rebote con el martillo Schmidt (%)	ISRM (1988)	<60	50-60	40-50	<40
Velocidad sónica (km/s)	EN 14579:2004	>6	4,5 - 6	3-4,5	<3
Resistencia a carga puntual (MPa)	ISRM (1985)	>8	4 - 8	1,5 - 4	<1,5
Tenacidad a la fractura (MPa·m ^{1/2})	ISRM (1988)	>1,7	1,0 – 1,7	0,6 – 1,0	< 0,6
Resistencia a la tracción indirecta (ensayo Brasileño)	ASTM D3967-95a (2004) ISRM (1978)	>10	5 - 10	2 - 5	<2
Los Ángeles (% de pérdida)	EN 1097-2:1998	<15	15 - 25	25 - 35	>35
Micro-Deval (% de pérdida)****	EN 1097-1:1996	<10	10-20	20-30	>30
Estabilidad frente a disoluciones de MgSO ₄ (% de pérdida)	EN 1367	< 2	2-10	10-30	>30
Pérdida frente al hielo-deshielo *****	EN 13383-2:2002	<0,5	0,1 - 1	1 - 2	>2

Figura B.6: Indicadores habituales de calidad y durabilidad. *** Si el ensayo de absorción de agua da como resultado <0.5 % la escollera es resistente a la cristalización de sales (sulfato magnésico) y al hielo-deshielo, por lo que no son precisas estas comprobaciones. **** Se preferirá siempre el ensayo Micro-Deval al Ensayo Los Ángeles. ***** Cuando sea necesario en función de las condiciones de exposición.

A partir de los datos anteriores y como resumen, pueden considerarse como parámetros principales ideales de calidad a emplear típicamente en las diferentes partes de estructuras marítimas los mostrados en la tabla B.8.

Parámetro	Piezas de manto exterior	Capas intermedias y filtros	Núcleos
Grado de meteorización	I-II	I-II	I-II
Espaciamiento de discontinuidades	1 m +	0.5 m +	0.2 m +
RQD (%)	80-100	75-100	55-100
Porosidad (%)	0-5	0-10	0-10
Absorción de agua (%)	<2	<2.5	<3
Resistencia a compresión simple (MPa)	>100	>100	>50
Densidad (kg/m ³)	>2600	>2600	>2000

Tabla B.8: Parámetros principales ideales de calidad

Respecto a la degradación de las propiedades de las escolleras, existen algunos modelos de estimación de su evolución, descritos en el epígrafe 3.6.5 y 3.6.6 del Rock Manual: Método Micro-Deval (MDE) y Método de designación de la calidad de las escolleras (AQD), así como métodos que tienen en cuenta la influencia de la fracturación parcial de las piezas de escollera, o el redondeo de sus aristas en caso de movimiento durante tormentas.

A la hora de aplicar estos métodos resulta de especial importancia considerar si se trata de secciones estáticas (donde los modelos generales de degradación son recomendados), o bien de secciones dinámicamente estables, en los que los mecanismos de degradación son más complejos por el propio movimiento de las piezas y las posibles fracturas. En todo caso, la aplicación de estos modelos de degradación debe llevarse a cabo con cautela, siendo recomendable llevar a cabo análisis de sensibilidad.

B.6.2 Alternativas para escolleras de baja durabilidad

De manera general, cuanto mayor sea la posibilidad de una pieza situada en una estructura marítima de sufrir desplazamientos en fase de servicio, mayores requisitos de durabilidad le serán exigidos al material. Por el contrario, materiales de baja durabilidad deben ser dispuestos en zonas menos susceptibles al movimiento (zonas más protegidas de las acciones exteriores).

El empleo de materiales de baja durabilidad puede estar justificado en los siguientes casos:

- Cuando haya registros de un buen funcionamiento con el paso del tiempo del mismo tipo de material en obras similares en la zona
- Cuando la agresividad del ambiente es moderada
- Cuando están programadas campañas de mantenimiento regulares y con alta frecuencia a lo largo de toda la vida útil
- En las piezas de manto, que pueden ser sobredimensionadas para tener en cuenta el efecto de la degradación con el paso del tiempo
- Tendiendo los taludes de manera que se reduzca la posibilidad de movimientos de material en casos de temporal
- Cuando se defina una colocación especial de las piezas de manto, de manera que se garantice una mayor trabazón entre ellas
- Cuando no existen alternativas a un coste razonable y pueda asumirse vidas útiles más cortas para la estructura

B.7 Costes de explotación de canteras

Los costes de explotación de canteras se detallan en el capítulo “Evaluación de costes de construcción y de reparación de un dique de abrigo” del Manual de apoyo para la puesta en práctica del articulado.

Referencias

- CIRIA, CUR y CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering*. Second edition. London: CIRIA (véanse páginas 38, 42, 44, 47, 48, 51).
- PIANC (2008). *Final report of the 3rd International Commission for the Study of Waves*. Bruselas (véase página 29).