

Utilización de rocas como pavimentos

Ana Bernabéu

Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA.

Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante

INTRODUCCIÓN

La utilización de la piedra natural en construcción se remonta a hace miles de años, siendo empleada como elemento básico en muchas civilizaciones. A pesar de la disminución de su uso en la arquitectura urbana que se observa hacia finales del siglo XIX (motivado por la aparición de nuevos materiales, como por ejemplo el cemento Pórtland), el uso de roca ornamental en pavimentación, techados, arte funerario y escultórico se mantiene como un sector en auge dentro de los materiales de construcción.

La elección de una roca para un determinado uso, en la mayor parte de los casos, obedece a sus cualidades estéticas, obviándose, en ocasiones, la idoneidad o no para ese fin. En el capítulo 8 de esta publicación se ha detallado cómo las propiedades de una determinada roca condicionan su uso y comportamiento como materiales de construcción, tanto en obra nueva como en un proyecto de restauración.

Además del estudio de las características intrínsecas de una roca, es de interés la realización de ensayos para evaluar su comportamiento una vez puesta en obra, teniendo en cuenta las distintas condiciones que van a afectar al material, tensiones, contacto con disoluciones, variaciones climáticas,... etc.

Por ejemplo, para una roca que va a ser colocada como pavimento es de gran utilidad determinar la carga de rotura máxima que ha de soportar, como consecuencia del tráfico peatonal, de vehículos,... etc. De este modo se puede evaluar, no sólo una determinada propiedad como es la resistencia a flexión, sino que para unas dimensiones dadas de baldosa se puede calcular la carga de rotura máxima que soportará, o bien, conociendo la carga a la que va a estar sometida por su uso, se puede calcular el espesor requerido de la baldosa.

A nivel específico el tema del uso de rocas en pavimentación ha sido muy poco tratado en la bibliografía, pero sí tenido en cuenta en la redacción de normas de ensayo específicas, entre las que nos afectan e interesan especialmente las normas europeas de producto. Entre estas normas son de especial interés las elaboradas por el Comité Técnico CEN/TC 178: “*Unidades y bordillos para pavimentación*”, entre las que se incluyen las de uso de piedra natural (bordillos, adoquines y baldosas) en pavimentos, y que se tratarán con más detalle a lo largo de este capítulo.

Así como para la determinación de las propiedades físicas de las rocas es habitual la realización de ensayos basados en procedimientos que se encuentran normalizados, es importante conocer los requerimientos para el uso de las mismas en una aplicación específica. El objeto de la normativa es doble, por un lado constituye un criterio básico de obtención de datos característicos de un material que sean comparables y por otro, permite tener un criterio que sirva como guía para el estudio de la adecuación de un material para un uso concreto (Molina, 2003; Shadmon, 2004). Algunas de éstas normas son la base para las certificaciones de producto y para el marcado *CE* de la piedra natural (Molina, 2005).

IMPORTANCIA DE LA UTILIZACIÓN DE ROCAS COMO PAVIMENTOS.

Entre los usos de la piedra natural en la construcción, la pavimentación es el que ha incrementado más notablemente en los últimos años, llegando a representar un porcentaje de material utilizado para este fin en torno al 40% respecto al volumen total de piedra natural elaborada en España (Figura 1).

Numerosos ejemplos pueden verse en distintas ciudades, donde la piedra ha sido empleada en centros históricos en cuyas construcciones la piedra ha desempeñado un papel fundamental. Un ejemplo es el caso del granito de Zarzalejo, empleado entre los siglos XV

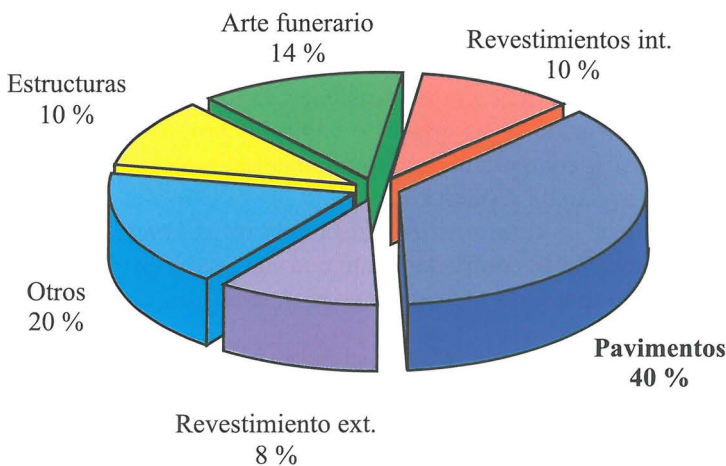


FIGURA 1. Cifras comparativas de los usos de la piedra natural respecto al volumen total de piedra elaborada en España. (Datos recogidos en las estadísticas de *La Piedra Natural en España Directorio Roc-Maquina 2004*).

y XVII en numerosos monumentos de la Comunidad de Madrid, destacando algunas obras como el Patio de los Reyes del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Figura 2A), o el caso de la Plaza Mayor de Madrid, donde se opta por recuperar distintos tipos de piedras que históricamente se había utilizado en su pavimentación: silex, lamprófidos y calizas (Figura 2B) (Bernabéu et al., 2004; García del Cura et al., 2002a)

Otro ejemplo es el casco histórico de Orihuela, en la Provincia de Alicante, donde se ha utilizado para pavimentar una de las rocas más utilizadas en elementos ornamentales de su Patrimonio Arquitectónico, un mármol calcítico denominado Piedra Jabalina o Piedra Negra de Callosa (García del Cura et al., 2002b).

Hay que mencionar que este uso no se limita a restauración o conservación de pavimentos ya construidos, sino que son numerosos los ejemplos de nueva construcción en la que se opta por el uso de rocas en pavimentos. Un ejemplo es la pavimentación de la entrada al Museo del Prado (en Madrid), en la denominada Puerta de Velázquez, donde se ha utilizado una dolomía calcárea microcristalina (denominada comercialmente Piedra Cenia) y granito (Figura 3A).

Además, en la actualidad, se incluyen en este uso, rocas cuyo empleo principal más tradicional ha sido otro diferente, como es el caso de pizarras y filitas, materiales empleados fundamentalmente para techar y que actualmente se usan ampliamente en pavimentos (Figura 3B).



A B
FIGURA 2. Ejemplos de uso de piedra en restauración en pavimentos históricos. A) Patio de los Reyes del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial. B) Plaza Mayor de Madrid.

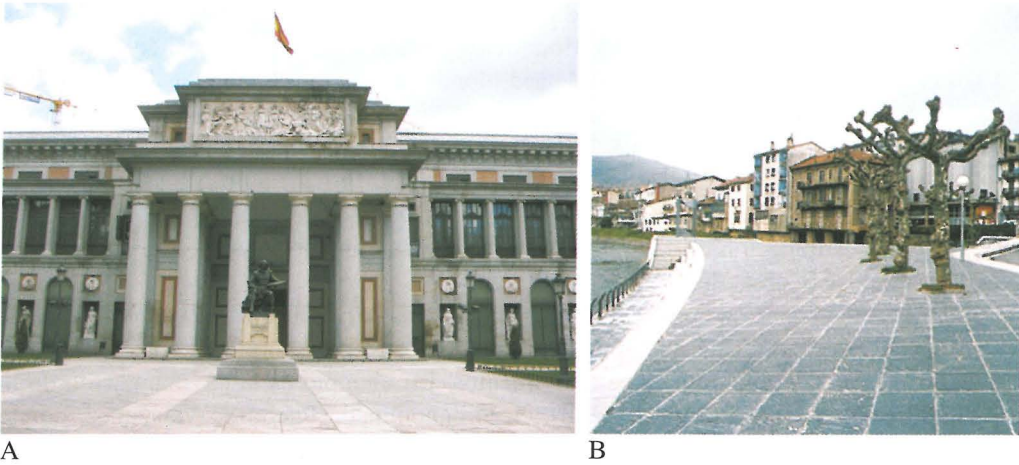


FIGURA 3. A) Pavimentación de la entrada de la Puerta de Velázquez del Museo del Prado en Madrid (dolomía calcárea microcristalina y granito). B) Pavimento de un paseo marítimo realizado con filita.

A la hora de utilizar piedra natural como pavimento de exteriores no sólo se deben tener en cuenta las propiedades físicas determinadas por los ensayos normativos de caracterización como roca ornamental, sino que también se deben considerar “normas funcionales”. Estas últimas son normativas específicas según un determinado uso, en las que se incluyen tanto la descripción de los métodos de ensayo para caracterización del material como los requisitos para su adecuada utilización.

De igual modo, la posible alterabilidad de la roca y el estudio de su comportamiento a lo largo del tiempo, no sólo debe determinarse en las probetas estándar que se usan para caracterizar las propiedades de la piedra natural, sino que también hay que hacer extensivos estos estudios a las dimensiones tradicionales de pavimentos, tanto de baldosas, como adoquines y bordillos.

A este respecto hay que mencionar la existencia de una serie de normas europeas (normas de producto) relacionadas con esta utilización de la piedra natural en las que se tiene en cuenta las consideraciones anteriormente citadas.

TIPOS DE PAVIMENTOS

Uno de los primeros conceptos que se debe considerar son los distintos tipos de pavimentación; para ello se realiza una revisión de la definición de los tres tipos más ampliamente empleados.

Se considera **baldosa** al elemento de piedra natural usado como material de pavimentación en el que la anchura nominal es mayor de 150 mm y generalmente superior al doble del espesor (UNE-EN 1341:2002).

Se habla de **adoquín** cuando se trata de un pequeño bloque de piedra natural para pavimentar con unas dimensiones nominales entre 50 y 300 mm, y dimensión no plana que

generalmente supera el doble del grosor. El grosor mínimo nominal es de 50 mm (UNE-EN 1342:2003).

Un **bordillo** es una unidad de más de 300 mm de longitud, comúnmente usado como borde en carreteras o senderos (UNE-EN 1343:2003).

En la figura 4 se muestra un ejemplo de cada uno de estos tipos (o formatos) de roca ornamental utilizados en pavimentación.

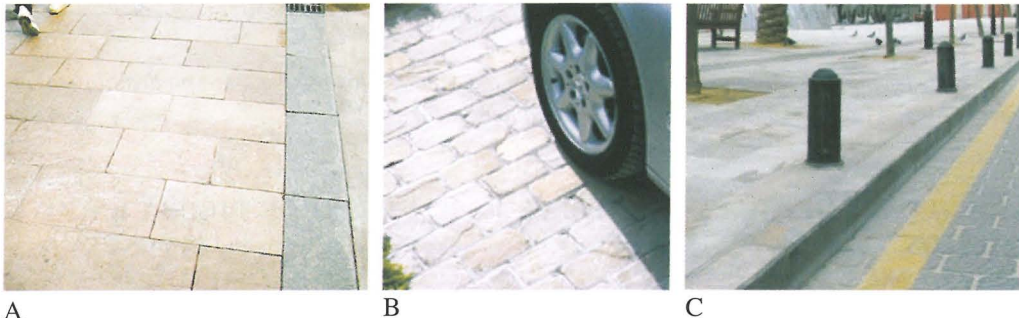


FIGURA 4. Ejemplo de los tipos de uso de piedra en pavimentos: A) Baldosas; B) Adoquines y C) Bordillo.

Para la utilización de piedra natural en pavimentos, dentro del proceso de elaboración, es habitual la realización de distintos acabados, cuya finalidad es modificar la apariencia superficial mediante uno o más tratamientos mecánicos o térmicos, produciendo un acabado superficial específico. De este modo se consigue un aspecto estético de la superficie del material que proporciona un valor añadido al producto elaborado por la versatilidad de su uso. Por tanto, además de los distintos tipos de formatos de las piezas usadas en pavimentos, en cada uno de los casos se emplean baldosas, adoquines o bordillos con textura (o texturados).

Aunque la realización de un tratamiento para dar un acabado superficial a una roca no debería modificar las características físicas del material respecto al no tratado, tal y como se ha comprobado en algunos estudios realizados (y que se comentará con algunos ejemplos) éste puede influir en el comportamiento de distintos materiales usados en pavimentos (García del Cura et al., 2004 y 2005, Bernabéu et al., 2004, Rojo et al., 2003). Como ejemplo se pueden citar el comportamiento hídrico y la resistencia al deslizamiento, siendo esta última una de las propiedades de mayor relevancia para el uso de una roca en pavimentos exteriores, y que es una de las que depende fundamentalmente del tipo de acabado superficial.

Entre los acabados superficiales más habituales se encuentran los siguientes: pulido, apomazado, al ácido, abujardado, flameado, lajado, estriado, arenado, escafilado y rústico.

Algunos ejemplos de estos acabados se muestran en la Figura 5.

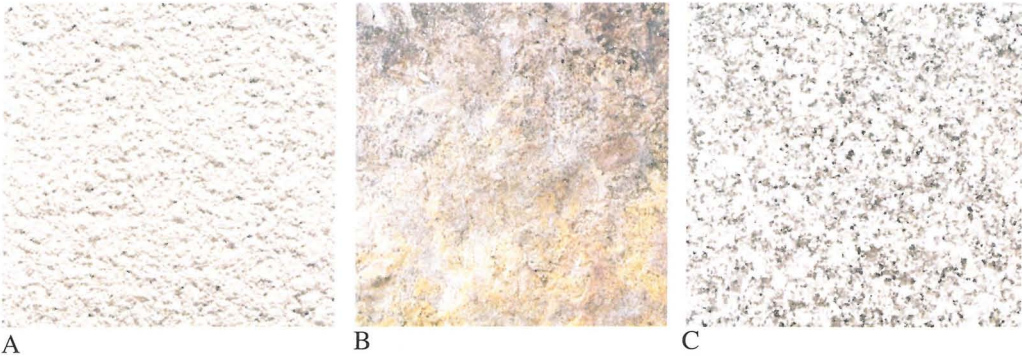


FIGURA 5. Ejemplo de algunos de los acabados comercializados para uso de piedra natural en pavimentos. A) Abujardado. B) Lajado. C) Flameado.

PROPIEDADES FÍSICAS DE INTERÉS PARA EL USO DE PIEDRA EN PAVIMENTOS

Para el uso de una roca como pavimento, algunas de sus propiedades físicas que van a condicionar su adecuación para este fin son su resistencia a flexión, resistencia al deslizamiento, resistencia a la abrasión o desgaste.

Además, en el caso de pavimentos exteriores, las rocas se encuentran expuestas a la acción de agentes meteóricos, especialmente el agua y a variaciones de temperatura y humedad, lo que hace que sea fundamental estudiar cómo afectan a las propiedades del material utilizado en el pavimento condicionando su durabilidad. Por tanto, propiedades como la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, humedad-sequedad, choque térmico y cristalización de sales son también de gran interés en función de las características climatológicas y del emplazamiento geográfico (proximidad a zonas costeras) de la zona donde la roca va a ser utilizada como pavimento. Hay que destacar a este respecto, que no sólo es importante evaluar la posible alteración por estos procesos, sino que se deberá tener en cuenta la posible variación de sus propiedades (estéticas, hídricas, mecánicas), en definitiva, la durabilidad de la roca, para así poder valorar su adecuación o no para ese uso, evaluando el comportamiento real de los materiales en obra.

A continuación se realiza una revisión detallada de las propiedades citadas anteriormente que influyen en mayor medida en el comportamiento de una roca usada como pavimento, destacando tanto el procedimiento para su determinación como ejemplos de valores experimentales obtenidos a partir de un estudio detallado de algunas rocas ornamentales empleadas en la actualidad en pavimentos. Dichos valores corresponden a datos obtenidos en el marco del proyecto de investigación: “*Evaluación de la durabilidad de la piedra natural utilizada en pavimentos de exteriores*”, financiado por el Ministerio de Fomento.

Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es uno de los parámetros de mayor importancia para el estudio de la adecuación de una roca con un acabado superficial concreto para su uso

en pavimentos, en especial cuando se trata de una obra pública. Se puede definir como la resistencia que opone la superficie de la roca a la fricción de una zapata de goma cuando incide sobre la misma por efecto de la caída libre del “brazo” en el que se encuentra situada.

El procedimiento experimental y el dispositivo necesario para su determinación fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación de Carreteras de Gran Bretaña. Dicho dispositivo consiste en un brazo pendular regulable, cuyo extremo está provisto de la zapata de goma, que se deja caer sobre la probeta a ensayar, determinándose mediante una escala graduada la fricción producida sobre la misma. En la Figura 6 se muestra el dispositivo experimental: Péndulo TRRL para ensayo de deslizamiento. El valor de la escala de medida va de cero a cien, siendo próxima a cero en el caso de una superficie de muy baja resistencia al deslizamiento (por ejemplo para superficies pulidas es habitual valores en torno a 10 en esta escala), correspondiendo los mayores valores a las superficies de mayor rugosidad (valores del orden de 70-80). El valor de esta escala se expresa como USRV (*Unpolished Slip Resistance Value: valor de la resistencia al deslizamiento de la superficie sin pulido*).

El valor obtenido de resistencia al deslizamiento dependerá en primer lugar del tipo de piedra: de su textura y su mineralogía. El valor de la resistencia al deslizamiento será especialmente negativo (valores bajos) debido a la presencia de algunos minerales, como es el caso de minerales de arcilla.

Otra de las características de la superficie de la roca que en mayor medida condicionará este parámetro será el tipo de acabado, siendo en general menor la resistencia al deslizamiento en el acabado “pulido” y mayor en otros tipos de acabado de mayor rugosidad superficial como son abujardado, escafilado... etc. Dada esta influencia, antes de utilizar

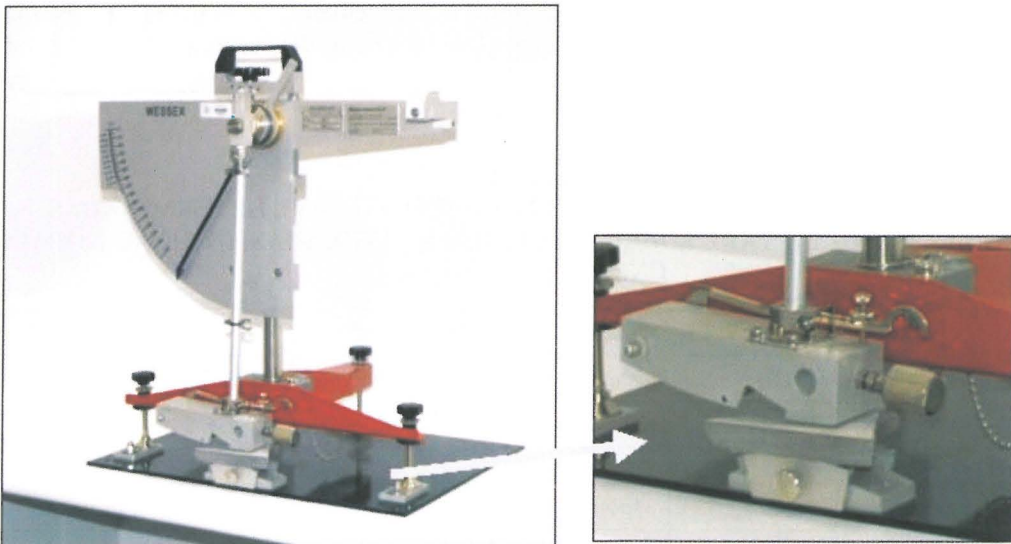


FIGURA 6. Péndulo TRRL para ensayo de deslizamiento.

una determinada piedra en una pavimentación exterior debería estudiarse el tipo de acabado mas idóneo en función de su resistencia al deslizamiento.

En la Tabla 1 se muestran algunos valores de resistencia al deslizamiento para dos rocas ornamentales ampliamente utilizadas como pavimento (García del Cura et al., 2003; Bernabéu et al., 2004). La primera de ellas se trata de una caliza micrítica (comercializada bajo la denominación de Gris Pulpis) y la segunda de granito de Zarzalejo. En este caso los valores han sido obtenidos según se detalla en el anexo D de la norma UNE-EN 1341, determinándose en todos los casos el valor de la resistencia del material sobre superficies saturadas en agua. Como reflejan los valores para ambos tipos de roca, el acabado pulido es el que presenta menores valores de este parámetro, siendo por tanto el menos aconsejable para su uso en pavimentos exteriores (siempre que no se añada ningún elemento de seguridad adicional).

En el extremo opuesto se encuentran por tanto los acabados que inducen una mayor rugosidad a la superficie, obteniéndose valores de resistencia al deslizamiento muy superiores.

En la actualidad, algunos estudios plantean la aplicación de un tratamiento con láser sobre la roca, o tratamientos químicos para la mejora de la resistencia al deslizamiento mediante la inducción de microrugosidad sobre la superficie de la piedra (Shadom 2004; Todt, 2000). Así mismo, cuando el valor de la resistencia al deslizamiento es bajo, y el material se va a utilizar como baldosa en escaleras, se aconseja la adecuación del mismo para este fin, mediante la realización de un tratamiento mecánico o la adición de productos antideslizantes, como bandas de caucho, carborundo u otro tipo de elemento de seguridad (UNE-EN 12058: 2005).

Hay que destacar la escasa documentación existente al respecto, no encontrándose en la bibliografía referente a normativas de construcción y/o seguridad, datos que regulen especificaciones acerca de valores mínimos de la resistencia al deslizamiento que debe tener un material para que se considere que su uso en pavimento va a ser “seguro”. Únicamente, en las normas elaboradas por el Comité Técnico CEN/TC 178 “*Unidades y bordillos para pavimentación*”, se apunta que, a partir de estudios experimentales, como dato de referencia se puede considerar, el valor 35 (USRV), como el límite a partir del cual se puede considerar en general un pavimento seguro.

TABLA 1
DATOS DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (USRV), DETERMINADAS
CON EL PÉNDULO TRRL SOBRE SUPERFICIES SATURADAS EN AGUA (NORMA
UNE-EN 1341. ANEXO D)

Caliza micrítica	Tipo de Acabado					
	<i>Pulido</i>	<i>Apomazado</i>	<i>Al ácido</i>	<i>Flameado</i>	<i>Abujardado</i>	<i>Amolado</i>
	10 ± 1	14 ± 1	17 ± 1	46 ± 1	84 ± 2	50 ± 1

Granito	<i>Pulido</i>	<i>Apomazado</i>	<i>Cara sierra</i>	<i>Abujardado</i>	<i>Flameado</i>
	20 ± 0,1	60 ± 0,1	72 ± 2,3	81 ± 0,4	83 ± 0,4

Resistencia a la abrasión (o desgaste)

La resistencia a la abrasión o desgaste podemos definirla como la capacidad de un material para resistir el desgaste superficial. Dicho valor se evalúa midiendo el desgaste producido en la cara vista de una probeta que se somete a rozamiento mediante un disco de acero y un material abrasivo bajo condiciones normalizadas. El dato de la resistencia al desgaste viene dado por la anchura de la huella producida en la cara ensayada del material.

El dispositivo de ensayo se compone esencialmente de un disco de abrasión; una tolva para almacenar el abrasivo; válvulas de control para regular la salida del abrasivo, un conducto de salida del abrasivo desde la tolva, un carro portaprobetas móvil y un contrapeso (Figura 7). Como material abrasivo se emplea corindón blanco de tamaño de grano 80. La velocidad de giro del disco es de 75 revoluciones por minuto y el flujo del caudal de caída del abrasivo de 2,5 litros por minuto.

Para la medida de la resistencia al desgaste se mide la dimensión de la huella producida por el abrasivo sobre el material ensayado. Para la obtención de este valor se deben realizar dos huellas en direcciones perpendicular y paralela y utilizar varias probetas (habitualmente 4). Como dato en cada medida realizada se toma la anchura de la huella en su punto medio (figura 8.B: dimensión AB), tomándose como dato final el valor medio de todas las medidas obtenidos. Para la calibración del equipo se utiliza “Mármol Boulonnaise” como material de referencia. El valor de la huella de este material es de $20,0 \pm 0,5$ mm.

Cuando menor es el valor de la anchura de la huella mayor será la resistencia a desgaste de la roca. El valor obtenido para la resistencia al desgaste dependerá fundamentalmente del tipo de roca. Como ejemplo de rocas que presentan valores altos de resistencia al desgaste (menor dimensión de la huella) podemos citar el ejemplo de los datos obtenidos

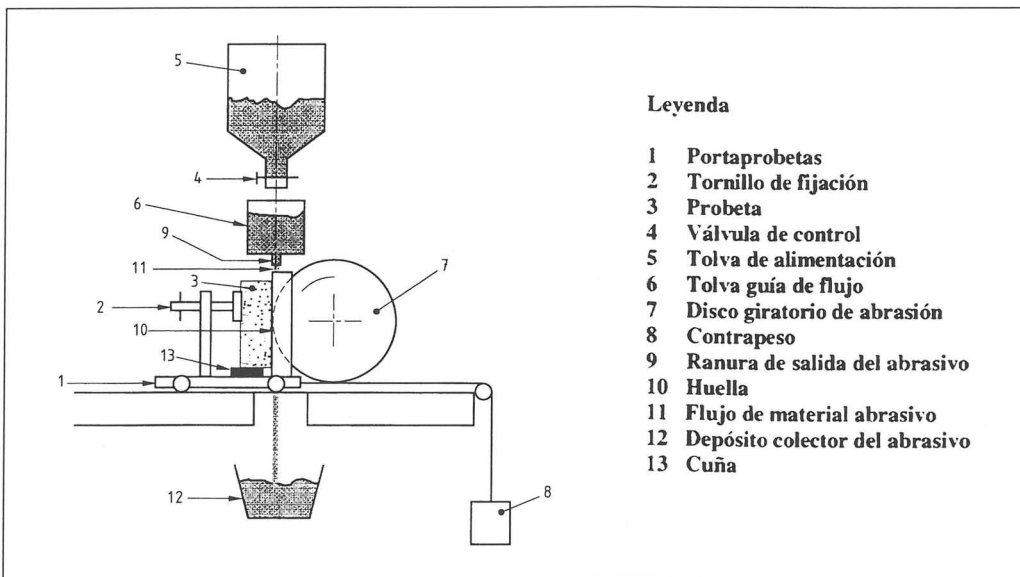


FIGURA 7. Esquema del dispositivo para la medida de la resistencia al desgaste.

para algunas rocas ígneas, como una diabasa (14,2 mm) y para un granito de grano fino (13,9 mm).

Al igual que se ha comentado en la resistencia al deslizamiento, y aunque en menor medida, también se ha observado la influencia del acabado superficial en el valor de la resistencia al desgaste. Así mismo, hay que destacar que la heterogeneidad de la superficie o debido a la propia textura natural de la piedra, en algunos casos no es posible la obtención de valores normalizados de este parámetro. Un ejemplo de este hecho ocurre con algunas metacuarcitas que se benefician y transforman en baldosas por lajado utilizando las discontinuidades naturales de la roca, dando lugar a superficies rugosas muy irregulares y de diferentes texturas (acabado rústico).

Además, algunos materiales presentan unos valores diferentes de resistencia al desgaste según la dirección en la que se produce la huella. Un ejemplo es el caso de los valores obtenidos en una baldosa de filita, para la que los valores obtenidos en las dos direcciones son respectivamente $37,0 \pm 1,0$ y $33,0 \pm 0,5$, obtenidos en dirección paralela y perpendicular al plano de la baldosa en la filita. (García del Cura et al., 2004).

En algunos casos se ha observado que un bajo valor de resistencia al desgaste en la superficie de una roca puede influir de forma negativa en el valor de su resistencia al deslizamiento. Este hecho puede entenderse analizando un ejemplo de los valores obtenidos para una pizarra con acabado de corte natural. El valor de la resistencia al deslizamiento es bastante alto (del orden de 70) y el valor de la resistencia al desgaste es del orden de 30 mm (valor no normativo). Este bajo valor de su resistencia a la abrasión puede hacer que la superficie se desgaste en mayor medida que otros materiales y por tanto la rugosidad característica de esta textura disminuya, influyendo negativamente en el valor de su resistencia al deslizamiento.

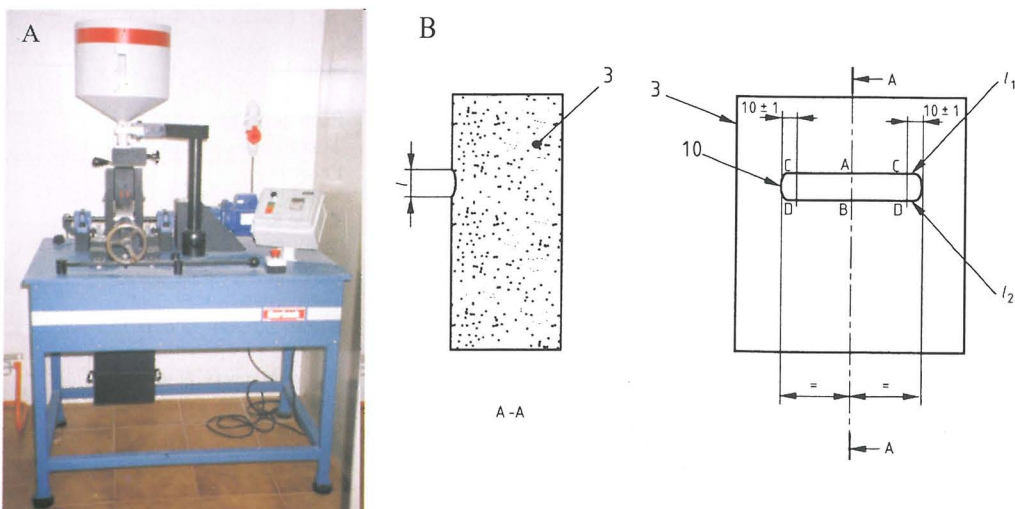


FIGURA 8. A) Dispositivo experimental para la determinación de la resistencia al desgaste. B) Esquema de la huella producida en la superficie ensayada y dimensión de su medida AB.

Resistencia a flexión y carga de rotura de baldosas

Como se ha visto con detalle en el capítulo 8 de este libro, el estudio de la estabilidad mecánica de las rocas es fundamental para evaluar su resistencia como roca ornamental. El efecto de tensiones sobre las rocas puede producir deformaciones y roturas dependiendo de las propiedades petrofísicas de las mismas y de las condiciones externas que afectan a la roca, siendo las propiedades mecánicas un parámetro importante que condicionará su durabilidad debido a la resistencia frente a los agentes de deterioro.

Entre los parámetros que cuantifican dichas propiedades mecánicas la medida de la resistencia a flexión es uno de los datos más utilizados. Además, para el uso de rocas en pavimentos es de gran utilidad la obtención de la carga de rotura que puede soportar una baldosa de un material pétreo teniendo en cuenta la resistencia a flexión bajo carga concentrada y sus dimensiones (Shadmon, 2004). De este modo se puede establecer el uso más adecuado de un material o bien planificar un dimensionamiento adecuado para un determinado requerimiento (Anexo B informativo de la Norma UNE-EN 1341:2002).

La carga de rotura (P) (kN) viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{R_f \cdot W \cdot t^2}{1500 \cdot L \cdot 1,6}$$

donde: t , W y L (mm), son respectivamente el espesor, la anchura y la longitud de la baldosa; R_f (MPa) es la resistencia a flexión bajo carga concentrada (UNE-EN 12372: 1999) y 1,6 es el factor de seguridad recomendado.

Como ejemplo, en la Tabla 2 se muestran los valores de la carga de rotura obtenidos considerando una baldosa comercial cuyas dimensiones son 300 x 600 mm, y espesores entre 20 y 40 mm, todas ellas dimensiones estándar comercializadas dependiendo del material del que se trate.

TABLA 2
VALORES DE LA CARGA DE ROTURA OBTENIDOS CONSIDERANDO
UNA BALDOSA COMERCIAL CUYAS DIMENSIONES SON 300 x 600 mm,
Y ESPESORES ENTRE 20 y 40 mm

	Pizarra	Filita	Metacuarcita	Caliza micrítica	Granito
$R_{flexión}$ (MPa)	23,7	47,7	12,9	14,2	16,5
Carga rotura (kN) t = 20 mm	2,0	4,0	1,1	1,2	1,4
Carga rotura (kN) t = 30 mm	4,4	8,9	2,4	2,7	3,1
Carga rotura (kN) t = 40 mm	7,9	15,9	4,3	4,7	5,5

De acuerdo a estos valores obtenidos se podría establecer el uso más adecuado según el requerimiento de carga de rotura (Tabla 3).

Análogamente, si se quiere utilizar una determinada roca ornamental para un uso concreto, por ejemplo, en la pavimentación de una zona peatonal con acceso ocasional de coches, vehículos ligeros y motocicletas o de una entrada de garajes (clase 3), la carga de rotura que debe soportar la roca es del orden de 6 kN.

Por tanto, a partir del dato de su resistencia a flexión y las dimensiones de las piezas se puede obtener el espesor requerido para un uso adecuado utilizando la siguiente expresión:

$$t = \sqrt{\frac{1500 \cdot L \cdot 1,6}{R_f \cdot W}}$$

En la Figura 9 se muestran dos ejemplos de utilización de piedra natural con distintos requerimientos de carga de rotura para los que sería necesario establecer las dimensiones adecuadas del material a utilizar tal y como se ha comentado.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN Y CORRESPONDIENTES ESPECIFICACIONES PARA CADA TIPO DE USO EN FUNCIÓN DE LA CARGA DE ROTURA MÍNIMA (ANEXO B INFORMATIVO DE LA NORMA UNE-EN 1341:2002)

Clase	Carga de rotura (mínima) (kN)	Uso característico
0	Ningún requisito	Decoración
1	0,75	Baldosas embebidas con mortero, áreas peatonales
2	3,5	Áreas peatonales. Bicicletas. Jardines y balconadas
3	6,0	Accesos ocasionales de coches, vehículos ligeros y motocicletas. Entrada de garajes
4	9,0	Aceras, áreas comerciales con uso ocasional de vehículos de emergencia y transporte.
5	14,0	Áreas peatonales, utilizadas frecuentemente con cargas pasadas
6	25,0	Carreteras, calles, gasolineras



FIGURA 9. Ejemplo de utilización de piedra natural con distintos requerimientos de carga de rotura. A) Pavimento de una plaza pública de tráfico fundamentalmente peatonal y paso ocasional de vehículos ligeros. B) Pavimento en una zona de tráfico de vehículos.

ESTUDIO DE LA DURABILIDAD

Para la evaluación la durabilidad de un material pétreo con el fin de predecir su comportamiento una vez puesto en obra, además del estudio de las características de la propia roca, se debe realizar una simulación de las condiciones ambientales a las que va a estar sometida. Básicamente se trata de someter a los materiales objeto de estudio a unas determinadas condiciones (temperatura, humedad relativa, contacto con disoluciones salinas, atmósfera con gases, ...etc.) para evaluar el efecto que se produce en los mismos.

Para la realización de los ensayos más adecuados en cada caso es de gran importancia tener en cuenta la ubicación del material, tanto las condiciones ambientales que va a soportar, (temperatura, humedad ambiental, proximidad al mar, presencia de agua), como los aspectos relacionados con su colocación.

Entre estos ensayos de durabilidad se pueden destacar: 1) Ensayo de heladicidad (ciclos de hielo-deshielo). 2) Ensayo de humedad-sequedad. 3) Ensayo de precipitación de sales en el interior de la roca (ensayo de cristalización de sales). 4) Otros: atmósferas simuladas; efecto de luz UV, concentración de gases, etc.

En el caso de la utilización de rocas en pavimentos exteriores las normativas al respecto únicamente tienen en cuenta el efecto de los ciclos de hielo-deshielo (Figura 10). Sin embargo, en este texto se van a comentar también otro tipo de ensayos, dado que en ocasiones debido a algunos usos de la piedra (como en fuentes, piscinas, ...etc.) los procesos de humedad-sequedad afectan en gran medida a los materiales en estas ubicaciones (Figura 11).

Ensayo de heladicidad

El objetivo de este ensayo es reproducir el efecto que sobre una roca produce la variación cíclica de cristalización de hielo en el interior de una roca que se encuentra saturada en agua. Éste sería uno de los procesos de deterioro que puede sufrir un material expuesto a unas condiciones ambientales contrastadas (por ejemplo por la variación cíclica día/noche). Al

igual que sucede en el caso de los ensayos de caracterización es habitual la realización de ensayos basados en procedimientos normativos. Estos procedimientos definen las condiciones del ensayo: temperatura y número de ciclos a ensayar, metodología de evaluación,...etc.

La evaluación de este ensayo se puede llevar a cabo, tanto con la inspección visual de las probetas ensayadas (pérdida de material, aparición de grietas o fisuras,...), como con la determinación de la pérdida de peso, o de una propiedad hídrica y/o mecánica, con el fin de estudiar su posible variación por efecto de los ciclos de hielo-deshielo.

En el caso de la utilización de una roca como pavimento la medida de la posible variación de la resistencia a flexión (y por lo tanto la carga de rotura del material) es uno de los datos de mayor importancia, ya que de este modo, a partir de los valores obtenidos en el laboratorio, se puede valorar si los requerimientos iniciales del material para ese uso se mantendrán con el paso del tiempo por efecto de las variación climáticas.

La realización de este estudio tendrá especial relevancia en zonas donde las condiciones climáticas supongan un índice de hielo elevado. Este índice de hielo se define teniendo en cuenta una relación de las temperaturas iguales o inferiores a -5°C durante todo el año (López-Mesones et al., 2004).

El procedimiento indicado en las normas de producto es el de la norma europea :UNE-EN 12371:2002, ensayo tecnológico, que consiste en la realización de 48 ciclos de 12 horas en los que, una vez saturadas las rocas en agua, éstas se someten a una disminución de temperatura hasta -15°C , y tras un periodo de tiempo, se descongelan por inmersión en agua a 20°C . Tras los ciclos se determina la variación de una propiedad mecánica, habitualmente la resistencia a flexión para el caso del estudio de la resistencia a la heladicidad de una roca para su uso como baldosa, y resistencia a compresión en el caso de uso como adoquín. Un esquema de este procedimiento se muestra en la Figura 10.

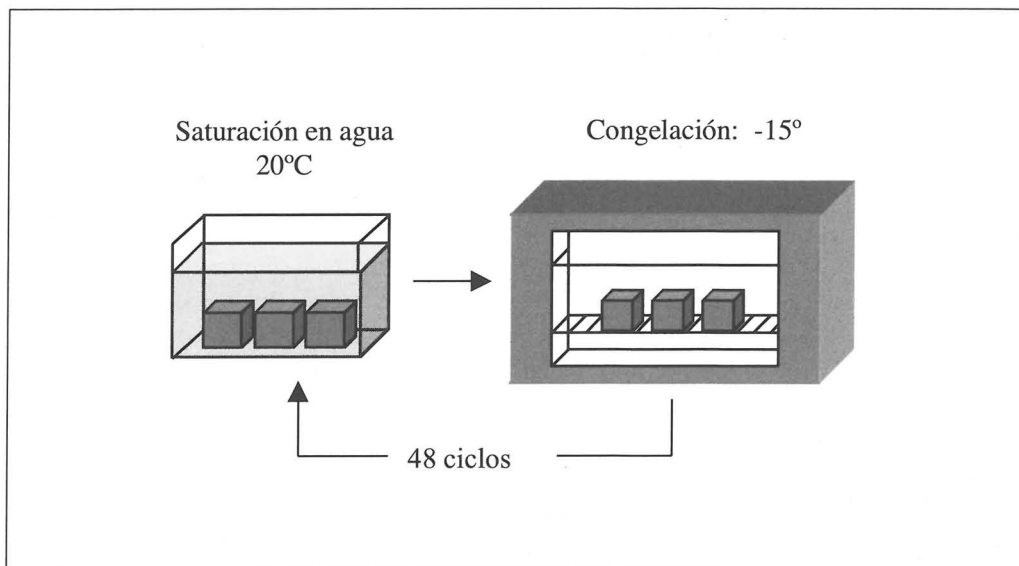


FIGURA 10. Esquema del procedimiento de los ciclos de hielo-deshielo.

Ensayo de humedad-sequedad

El objetivo del este ensayo es conocer el efecto de los procesos relacionados con la saturación de agua y el secado de los materiales pétreos procurando simular la alternancia de los días secos y lluviosos. Este efecto también se produciría en el uso de materiales pétreos en su utilización en elementos en contacto con agua como en los ejemplos mostrados en la Figura 11. Las alteraciones producidas en el material se atribuyen fundamentalmente al efecto de la presión capilar, la acción disolvente del agua, hinchamiento de materiales arcillosos, etc.

El procedimiento experimental consiste básicamente en ciclos alternos de inmersión en agua y secado a temperatura controlada. Cada ciclo de 24 horas incluye una etapa en la que las probetas se sumergen totalmente en agua y otra etapa posterior en la que se introducen en una estufa para su secado (60-100°C). A continuación las probetas se dejan enfriar antes de la nueva inmersión en agua para completar el ciclo y evitar choques térmicos.

El número de ciclos a realizar suele ser elevado (entre 20 y 30), ya que la agresividad del ensayo no es muy alta, aunque para materiales con un contenido en minerales arcillosos (superiores al 10%), un menor número de ciclos es suficiente para evaluar su comportamiento. Al finalizar los ciclos se evalúa la alteración sufrida por el material, pérdida de masa, variación de propiedad hídrica, etc.

En algunos casos puede interesar no incluir la etapa de enfriamiento, ya que de este modo se reproducen mejor las condiciones de lluvia (saturación de agua del material), secado (evaporación de esa agua) y calentamiento de la superficie del material cuando la temperatura exterior es elevada. De esta forma se evalúa conjuntamente el efecto de la humedad-sequedad con el choque térmico sufrido por el material en esas condiciones.

Como ejemplo de esto último podemos considerar un material en cuyo lugar de colocación se conocen las condiciones de temperatura y humedad relativa máximas durante un año, y que son: $T_{máx}^a$: 30°C; $T_{mín}^a$: 2°C; $HR_{máx}$: 80%; $HR_{mín}$: 60% con precipitaciones tanto en el periodo de verano como en invierno.

Teniendo en cuenta dichas condiciones climáticas se puede diseñar un ensayo de envejecimiento consistente en ciclos de saturación en agua - secado. Cada uno de los ciclos consta de las siguientes condiciones:

Inmersión en agua (10 - 20°C) → Secado (50°C)



Si no se incluye la etapa de enfriamiento, se pueden reproducir de forma más real las condiciones de lluvia (saturación de agua del material), secado (evaporación de esa agua) y calentamiento de la superficie del material. Considerando que la temperatura ambiente pueda ser de 30°C, en la superficie de un material oscuro se puede llegar a alcanzar una temperatura alrededor de 50°C. De esta forma se evalúa conjuntamente el efecto de la humedad-sequedad con el choque térmico sufrido por el material en esas condiciones.



FIGURA 11. *Ejemplo de utilización de piedra natural como pavimentos donde el material se encuentra sometido a la acción de ciclos-humedad-sequedad.*

Ensayo de cristalización de sales y niebla salina

Cuando una disolución rica en sales entra en el interior del sistema poroso en un material, por ejemplo por capilaridad, a partir de la misma pueden precipitar fases minerales salinas cuya cristalización genera una determinada presión. La variación cíclica de disolución/precipitación de estas sales, debidas a la variación de las condiciones de temperatura y humedad relativa, constituye uno de los procesos de deterioro más importantes en los materiales pétreos. La alteración sufrida por el material, implica tanto alteración estética (aparición de eflorescencias), como disminución de propiedades mecánicas (pérdida de cohesión de material) y pérdida de masa.

Los ensayos más habituales consisten en la saturación de las muestras en una disolución salina (habitualmente Na_2SO_4) y posterior secado. Tras un periodo de enfriamiento se completa el ciclo con la nueva inmersión de las probetas en la disolución (Norma UNE-EN 12370: 1999). Existen otras metodologías que reproducen de manera más real el deterioro sufrido por un material pétreo una vez colocado en obra, que se basan en el efecto que ejercen variaciones climáticas, similares a la que se pueden producir por efecto día-noche, en los movimientos de las disoluciones por capilaridad (Benavente et al., 2001).

Los criterios más utilizados para evaluar estos ensayos consisten básicamente en la inspección visual de las probetas ensayadas y la determinación de la pérdida de peso.

Además del proceso de cristalización de sales, cuando una roca se utiliza en un emplazamiento, por ejemplo en una zona costera (pavimentación de un paseo marítimo, Figura 12), el material está afectado al efecto de lo que se conoce como “niebla salina”. Básicamente se trata de la acción de la impregnación de la superficie de aerosol salino y su posterior secado, provocando la precipitación de sales tanto en el interior como en la superficie del material. Existe también un procedimiento normalizado para el estudio del efecto producido sobre los materiales que van a ser empleados en estas condiciones (Norma UNE-EN 14147: 2003).



FIGURA 12. Ejemplo de uso de roca ornamental en la pavimentación de un paseo marítimo, (Playa de San Juan, Alicante).

COLOCACIÓN

A la hora de la utilización de una roca, no sólo es de interés conocer como pueden afectar todos los procesos mencionados a su durabilidad. No podemos olvidar y nuestra experiencia así nos lo indica, que la adecuada colocación del material, el comportamiento de los morteros utilizados para su colocación, son aspectos que no deben menospreciarse y que deberían ser objeto de estudio. La utilización de rocas en pavimentación precisa, además de un dimensionamiento adecuado de las piezas, una adecuada colocación que comprende la presencia de diferentes capas infrayacentes al pavimento propiamente dicho (García de los Ríos y Baez, 2001) y que obedece a la tipología general que se muestra en la Figura 13.

La *capa A* o de pavimento en sentido estricto está constituida por baldosas cuyo grosor será función de las características petrofísicas de la roca a utilizar.

La *capa B* o capa de adherencia sirve de unión entre la baldosa y la capa de reparto. Es una capa de mortero que no debe superar 10 mm de grosor.

La *capa C* o capa de reparto transmite las cargas físicas desde el pavimento en sentido estricto al soporte o explanada. Está constituida por mortero de cemento y debe llevar una armadura de malla electrosoldada. Su grosor debe depender de la calidad del soporte o explanada y del tipo de tráfico que está previsto que vaya a soportar el pavimento.

Por debajo de la capa de reparto pueden situarse láminas impermeabilizantes, si se estima oportuno, o capas aislantes térmicas o acústicas (*D/E*). Estas se colocan, para su mayor protección, sobre una capa de regularización (*F*) generalmente constituida por un

mortero de cemento y arena. Todo el conjunto se sitúa sobre un soporte o explanada que es la base del pavimento y puede estar constituido por un suelo o un hormigón cuya calidad será función del tráfico previsto, estando normalizada su determinación.

Otro aspecto importante a considerar es el de las juntas entre las distintas piezas. Dichas juntas representan las uniones entre las piezas contiguas y tiene por objeto absorber las irregularidades dimensionales de las piezas, así como la falta de rectitud de aristas. Su espesor mínimo recomendado es de 1 mm. Además de esta unión entre las piezas se deben considerar las juntas estructurales, y las de dilatación. A este respecto hay que mencionar que será importante tener en cuenta otras características, como las propiedades térmicas, tanto de la roca como del resto de elementos que componen el conjunto del pavimento.

El uso de las rocas en pavimentos, se trata por tanto de un tema multidisciplinario complejo que se debe analizar en todo su conjunto y donde se debe tener en cuenta todos los aspectos mencionados en este capítulo.

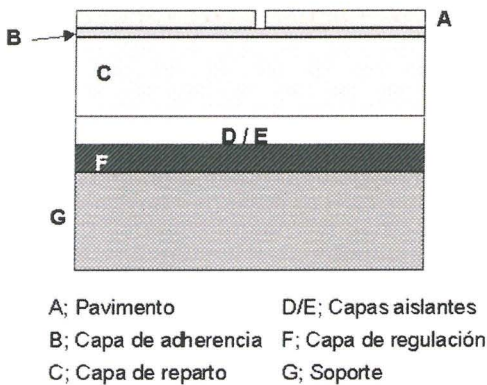


FIGURA 13. Representación esquemática del perfil de la tipología general de las distintas capas de un pavimento para su adecuada colocación. B) Ejemplo de este esquema en la colocación de un pavimento.

BIBLIOGRAFÍA

- Bell, F.G. (1993). Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology* 21: 87-200.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Bernabéu, A., Ordóñez, S. (2001). Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology* 59: 313-325.
- Bernabéu, A., Benavente, D., Fort, R., García del Cura, M.A., Martínez, J., Menduina, J. (2004). Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascos históricos. *6ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*. Sevilla: 17-19.

- Bustillo, M., Calvo, J.P. (2005). *Materiales de construcción*. Ed: Fuelle. 458 pp.
- Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F. J., Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales cerámicos pétreos y cerámicos*. *Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, 139 pp.
- García de los Ríos, J.I., Baez, J.M. (2001). "La Piedra de Castilla y León". Junta de Castilla y León, 345 pp.
- García del Cura, M.A., Bernabéu, A., Benavente, D., Fort, R. (2005). Aspectos texturales y petrofísicos de diferentes acabados en calizas microcristalinas. *Macla* 3: 91-93.
- García del Cura, M.A., Bernabéu A., Benavente, D., La Iglesia, A., Ordóñez, S. (2004). Pizarras y metacuarcitas como pavimentos de exteriores: las rocas de Bernardos (Provincia de Segovia). *Geotemas* 6, (1), 259-262.
- García del Cura, M.A., Bernabéu, A., Benavente, D., Ordóñez, S. (2002a). La pavimentación de exteriores; un uso de gran interés económico para la piedra natural. En "Mármol de Alicante" Ed. Mármol de Alicante, Asociación de la Comunidad Valenciana: 81-83.
- García del Cura, M.A, Fort, R., Bernabéu, A., Benavente, D., Ordóñez, S. (2003). Rocas carbonáticas como pavimentos exteriores en cascos históricos: calizas microcristalinas. *4ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*. Sevilla Diciembre 2003. *Air pollution & Cultural Heritage*: 101-102.
- García del Cura, M.A., Louis, M., Rodríguez, M.A., Bernabéu, A., Benavente, D., Ordóñez S. (2002b). La Piedra Jabalina o Piedra Negra de Callosa: un mármol calcodolomítico utilizado en el Patrimonio Arquitectónico del Sur de la Provincia de Alicante. *2ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*. Madrid. Pág. 10.
- López-Mesones, F., Escribano-Villán, J., Nieves-Aguirre, G. (2004). *Manual del uso de la piedra en la Arquitectura*. CSCAE. Consejo Superior de los colegios de Arquitectos de España. Informstone Technic & Business, 400 pp.
- Molina, A. (2003). Marcado CE de productos de piedra natural. *Litos* 67: 70-81.
- Molina, A. (2005). Certificación de producto de piedra natural. Denominación de origen. *Litos* 80, 132-142.
- Rojo, A., Alonso, F.J., Esbert, R. (2003). Propiedades hídricas de algunos granitos ornamentales de la península ibérica con distintos acabados superficiales: interpretación petrofísica. *Materiales de Construcción*, 53 (269): 61-72.
- Shadmon, A. (2004). Floor & Paving Stone Geotechnics. *Litos* 74: 82-109.
- Todt, G. (2000). Slip Prevention on Polished Natural Stone - Which Procedure Is Most Suitable?. *Litos* 46: 28-37.
- UNE-EN 1341:2002. *Baldosas de Piedra Natural para uso como pavimento. Requisitos y métodos de ensayo*. AENOR. Madrid. 38 pp.
- UNE-EN 1342:2003. *Adoquines de piedra natural para su uso como pavimento. Requisitos y métodos de ensayo*. AENOR. Madrid. 36 pp.
- UNE-EN 1343:2003. *Bordillos de piedra natural para su uso como pavimento. Requisitos y métodos de ensayo*. AENOR. Madrid. 27 pp.
- UNE-EN 12058:2005. *Baldosas para pavimentos y escaleras. Requisitos*. AENOR. Madrid. 33 pp.
- UNE-EN 12370:1999. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales*. AENOR. Madrid. 10 pp.

- UNE-EN 12371:2002. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad*. AENOR. Madrid. 16 pp.
- UNE-EN 12372:1999. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada*. AENOR. Madrid. 15 pp.
- UNE-EN 14147:2003. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina*. AENOR. Madrid. 11 pp.