

La piedra monumental de la ciudad de Zamora (España). Valoración de la calidad y estado de deterioro¹

MÓNICA AÑORBE URMENETA (*) FCO. JAVIER SÁINZ DE CUETO TORRES (**) JOSÉ MARÍA MARTÍN POZAS (***)

RESUMEN Se ha realizado un estudio de las propiedades, características y cualidades como material de construcción de la piedra monumental de la ciudad de Zamora en su estado natural. Para ello se han determinado la petrografía y mineralogía, propiedades de estructura, hídricas y físico-mecánicas de la roca. A partir de estos datos se ha evaluado la alterabilidad de la roca de cantera. Esta resulta ser baja, del orden del 5,5% y revela una calidad mecánica excelente.

Se han determinado las mismas propiedades para la piedra procedente de los distintos monumentos y se ha efectuado un estudio comparativo de los valores que permite comprobar que, con el envejecimiento, la piedra presenta especies mineralógicas de neoformación, y sufre una disminución en sus propiedades resistentes.

Las sales neoformadas son yeso, halita, calcita, whewellitita, weddellitita, y trazas de dolomita. Su presencia constituye un peligro para la roca debido a las presiones de cristalización y confinamiento que ocasionan modificaciones en el sistema poroso de la roca. Estas modificaciones originan la mayor parte de los indicadores de alteración que se han observado en los sillares de los monumentos y que han sido catalogados en el estudio.

En un intento de cuantificar el deterioro de la piedra, desde el momento de su puesta en obra hasta la actualidad, se han seleccionado seis parámetros de seguimiento. Analizando la variación relativa de estos parámetros dentro de su intervalo de variación se ha cuantificado la durabilidad de la roca mediante un Índice de Conservación. Este índice ha quedado fijado en un 78% para la roca de cantera y un 37% para la de monumento.

THE ORNAMENTAL STONE OF THE CITY OF ZAMORA (SPAIN). QUALITY AND DURABILITY ASSESSMENT

ABSTRACT A research study on the characteristics, properties and quality of the Zamora's rock, as a building material, has been carried out in the Central Laboratory of Structures and Materials, CEDEX, MOPTMA. The research was sponsored by CEHOPU (Center of Historical Studies of Public Works). The testing program includes the mineralogical and petrographic characterization, the hydric behavior and the physical and mechanical response. Taking into account the different properties of the stone and the mathematical relationship between the parameters, it is feasible to assess the alterability and expected progressive damage of the quarry stone matrix under environmental agents. The experimental data reveals a small alterability index, about 5,5%, and an excellent mechanical quality.

On the other hand, the same method was applied to specimens taken from several Zamora's monuments and a comparative assessment between the quarry rock and the old stone was done. The comparative values show a decrease of the strength parameters, with the stone aging, and the appearance of new mineralogical compounds.

These new products are generally salts as gypsum, halite, calcite, calcic malates as whewellitite and weddellitite, dolomite, etc. Their appearance constitutes a danger for the matrix rock durability because of the crystallization and confinement pressures and stresses generated into the porous system and internal structure. These modifying changes explain most of the alteration indicators observed, on the surface of the buildings and on their removed hewn stones during restoration, and catalogued by the present study.

In an attempt to quantify the stone decay, from the setting up during construction to the present moment, six main parameters have been selected for the survey. Analyzing their relative variation inside their intervals, a Conservation Index of the rock durability, has been settled. This Index shows a 78% value for the average shallow quarry rock and a 37% value for the oldest monument stones.

Palabras clave: Conglomerado opalino; Piedra ornamental; Alteración; Zamora; Índice de Conservación.

1. INTRODUCCIÓN

Se estudia la naturaleza, causas y mecanismos de degradación de la principal piedra monumental de la Ciudad de Zamora, que se utilizó de forma masiva en toda la arquitectura

románica, y que procede de múltiples canteras que se encuentran en las proximidades de la ciudad.

Los mampuestos románicos son fundamentalmente de mampostería aparejada y concertada, con mampuestos labrados en forma de sillar y con distintas alturas en las diferentes hiladas. Los mampuestos están dispuestos, básicamente, a soga y sus dimensiones medias son: 80 cm de soga, 40 de tizon y 20 de canto o altura.

La roca es un conglomerado silíceo que procede de los afloramientos, en la provincia de Zamora, del tramo superior silicificado de la Unidad Inferior del Paleógeno continental del borde suroccidental de la cuenca del Duero. La interpretación genética de estas facies es que son productos de demolición o removilización de un manto de alteración latóritica producido en climas tropicales (Millet, 1964 y 1967). El medio sedimentario debe estar constituido por barras de arenas y gravas de un sistema fluvial trenzado tipo "brai-

¹ Ponencia presentada en el 1995 LCP Congress "Preservation and restoration of cultural heritage: Stone materials, air pollution, masonry, scientific research work and case studies", Laboratoire de Conservation de la Pierre, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza, Septiembre 1995.

(*) Doctora en Ciencias Geológicas, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX (M^o de Fomento).

(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX (M^o de Fomento).

(***) Doctor en Ciencias Químicas, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.

ded". Se deducen grandes canales alejados del área fuente por sus condiciones de madurez. Aguas de escorrentía cargadas de sílice circularían a través de los depósitos arenosos y conglomeráticos quedando allí confinadas y por efecto de la aridez precipitaría la sílice en forma de ópalo (Bustillo y Martín Serrano, 1980).

La ciudad de Zamora se asienta sobre una estratégica terraza fluvial (640 m de altura) del río Duero constituida por los conglomerados y areniscas terciarias con los que están construidos la mayor parte de los edificios históricos de dicha ciudad. El clima es típicamente continental, caracterizado por el marcado rigor de sus largos y fríos inviernos, con fuertes heladas y nieblas muy frecuentes. Los veranos por el contrario son cortos y moderadamente calurosos, aunque con una acusada sequedad. La oscilación térmica anual y diaria es elevada. Algunas características climáticas son las siguientes (Souza, 1988):

- 57 días de heladas al año.
- 143 días de período invernal medio.
- precipitación 365,5 mm anuales.
- 35,1 días de niebla al año.
- insolación anual 2712,2 horas (el 61% de la teórica).
- vientos pocos fuertes y preferentemente del SO.

La contaminación atmosférica en la ciudad puede considerarse escasa, y procede fundamentalmente del uso de combustibles fósiles en vehículos y calefacciones. En el entorno de los edificios singulares las viviendas son antiguas, con calefacciones de carbón y gasoil, y existe tráfico rodado. Los datos máximos registrados de los principales contaminantes son: 52,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 , 79,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 , 13,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO , 4,1 mg/m^3 de CO , 5,6 mg/m^3 de hidrocarburos y 33,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas en suspensión.

Para llevar a cabo el estudio se han recogido dos tipos de muestras:

- a) Roca de cantera: muestras de roca procedentes de la cantera de "El Juncal", cuyo frente se encuentra activo en la actualidad, y
- b) Roca de monumento: muestras superficiales (fragmentos y desplazaciones) de paramentos románicos de diversas

iglesias y de Las Murallas, y sillares de roca enteros procedentes de las hiladas inferiores de la fábrica de sillería de la iglesia de San Pedro y San Ildefonso (Siglos XI-XIII) restaurada recientemente.

2. MINERALOGÍA Y PETROLOGÍA

La caracterización mineralógica y petrológica de la roca se ha determinado utilizando diversas técnicas de reconocimiento: difracción de rayos X, microscopía óptica de transmisión y electrónica de barrido con microanálisis por energías dispersivas de rayos X, análisis químico, análisis térmico diferencial y termogravimétrico, espectroscopía infrarroja, etc.

La roca es un conglomerado sílice constituido por clastos de cuarzo y cuarcita, fundamentalmente, y un aglomerante o cemento opalino que permite que los clastos mantengan entre sí contactos puntuales y raramente lineales. Los clastos son subangulosos y abarcan un amplio intervalo granulométrico.

La composición mineralógica de la roca procedente de cantera es:

- a) los **clastos** son fundamentalmente de cuarzo mono y policristalino, fragmentos de roca, sobre todo cuarcita, y cristales de moscovita y turmalina como minerales accesorios,
- b) el **cemento** es opalino, de los tipos ópalo A y ópalo CT, y sobreimpuesto a él aparece otro cemento ferruginoso de goethita-hematites que proporciona a la roca tinciones amarillo-naranjas, rojas, moradas e incluso negruzcas en forma de manchas irregulares. También aparece un cemento arcilloso presente en el sistema poroso de la roca por cristalización "in situ" de esmectitas, y
- c) la **matriz** es arcillosa de illita-caolinita dispersa en el seno del cemento opalino.

En la roca procedente de monumento se observa la mineralogía anteriormente descrita y algunas fases de neoformación. Los fragmentos superficiales muestran la presencia de calcita, yeso, halita, oxalatos cálcicos (whewellitita y weddellitita), y trazas de dolomita que no se habían detectado en la roca de cantera.

TABLA 1. Propiedades de estructura e físicas de la roca de Zamora.

PROPIEDAD		MEDIA	INTERVALO
DENSIDAD REAL [g/cm^3]	Cantera	2,56	2,49 - 2,64
	Monumento	2,53	2,51 - 2,58
DENSIDAD APARENTE [g/cm^3]	Cantera	2,23	1,98 - 2,36
	Monumento	2,15	1,99 - 2,33
POROSIDAD ABIERTA (%)	Cantera	11,0	7,30 - 23,40
	Monumento	15,8	9,35 - 22,38
CONTENIDO EN HUMEDAD DE SATURACIÓN (%)	Cantera	5,7	2,70 - 10,80
	Monumento	6,7	3,56 - 10,06
COEFICIENTE DE SATURACIÓN (%)	Cantera	89,8	73,3 - 97,4
	Monumento	90,1	85,1 - 94,7
CAPACIDAD DE IMBIBICIÓN (ABSORCIÓN) (%)	Cantera	3,78	3,09 - 4,41
	Monumento	6,73	3,44 - 10,15
RETENCIÓN DE AGUA (DESORCIÓN) (%)	Cantera	71	68 - 79
	Monumento	12	3 - 22

PROPIEDAD		CANTERA	MONUMENTO	INCREMENTO
COMPRESIÓN	Módulo medio (Kp/cm ²)	382.842	215.178	-44%
	Resistencia media (Kp/cm ²)	908	420	-54%
TRACCIÓN	Módulo medio (Kp/cm ²)	335.834	158.862	-53%
	Resistencia media (Kp/cm ²)	81,4	45,4	-44%
DESGASTE	Pérdida media de altura (mm)	4,2	7,4	+76%

TABLA 2. Propiedades físico-mecánicas de la roca de Zamora.

A cada una de estas fases neoformadas se le ha atribuido uno o varios orígenes a partir del estudio combinado de su morfología, situación en el edificio, etc.:

- **calcita** (dolomita), originada por contaminación a partir de morteros de cal y de cemento portland utilizados en el rejuntado de sillares, y cuya portlandita se encuentra totalmente carbonatada.
- **yeso**, precipitado a partir de los óxidos de azufre atmosféricos derivados del uso de combustibles fósiles.
- **halita**, presente en la roca a partir del agua de capilaridad y procedente de aguas residuales del subsuelo, o de vertidos de sales con el fin de eliminar el hielo de las vías urbanas.
- **oxalatos cálcicos**, constituyentes de la que se ha llamado "pátina naranja" o "pátina de oxalatos" cuyo origen se debe al envejecimiento de antiguos tratamientos protectivos. Las proteínas de las sustancias aplicadas se transforman en oxalatos cálcicos.

Estas sales se encuentran presentes en las zonas superficiales de los sillares, en forma de eflorescencias blanquecinas, o como constituyentes de la "pátina negra" (yeso, partículas atmosféricas y microorganismos). La presencia de sales en el sistema poroso de la roca ocasiona su deterioro por acción de diversos mecanismos debidos a la presión de cristalización y confinamiento, y a las dilataciones térmicas diferenciales de dichas sales.

3. PROPIEDADES DE ESTRUCTURA E HÍDRICAS

Se han determinado distintas propiedades físico-estructurales e hídricas de la roca de cantera y monumento: densidad real y aparente (Test I.2 - RILEM, 1980), porosidad abierta o accesible al agua (Test I.1 - RILEM, 1980), coeficiente de saturación (Test II.1 - RILEM, 1980), absorción de agua por capilaridad (Test II.6 - RILEM, 1980), absorción de agua por inmersión total y desorción libre de agua (NORMAL 7/81), y permeabilidad al vapor de agua (NORMAL 21/85).

La densidad real de la roca se mantiene con el envejecimiento, mientras que la densidad aparente disminuye debido a que se produce un incremento de la porosidad abierta de la roca (Tabla 1). Este aumento del volumen poroso total se manifiesta a su vez en: aumento del coeficiente de saturación, descenso de la succión capilar o capacidad de ascensión de agua por capilaridad, aumento de la capacidad de absorción de agua por inmersión total y de la velocidad de desorción libre de agua, y aumento de la permeabilidad al vapor de agua.

Las modificaciones que sufre el sistema poroso de la roca se deben a un aumento de la interconexión de la porosidad atrapada y un aumento del diámetro de los poros existentes. Este hecho ha sido corroborado mediante la observa-

ción por SEM y el estudio por porosimetría de intrusión de mercurio (Añorbe et al., 1992).

4. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Para valorar la calidad mecánica de la roca de cantera, y su descenso a lo largo del tiempo de exposición en el monumento, se han seleccionado los siguientes ensayos: resistencia a rotura por compresión simple (UNE 22-175-85), resistencia a rotura por flexión (UNE 22-176-85), resistencia al desgaste por rozamiento (UNE 22-173-85), módulo de elasticidad a compresión y tracción (ASTM C-469), y resiliencia (MELC 7.001).

El comportamiento en compresión de la roca responde a una curva tensión-deformación de tipo elastoplástico (Tipo III) según Miller (1965) (Figura 1). Sin embargo, el análisis comparativo roca cantera-monumento muestra dos importantes modificaciones en dicha curva: reducción significativa del módulo de deformación (44%), lo que hace que a igualdad de cargas sea mucho más deformable la roca de monumento, y caída sustancial de la capacidad resistente de la piedra con el envejecimiento (54%), mostrando una campana de rotura mucho más amplia y con liberación progresiva de la energía, frente a la liberación explosiva de energía en la roca de cantera (Tabla 2). Este comportamiento se debe a una plastificación gradual del cemento opalino por microfisuración (Fotos 1 y 2). La superficie de rotura es neta en la roca de cantera y afecta por igual a clastos y cemento, mientras que en la roca de monumento la fractura es pulverulenta y los clastos se desprenden del cemento opalino.

El comportamiento de la roca en flexión define una curva tensión-deformación igualmente de tipo elastoplástico pero con dos cambios importantes de la roca de monumento con respecto a la de cantera: una reducción notable del módulo de deformación en tracción (53%) y un descenso sustancial de la resistencia a tracción con el envejecimiento (44%). La fractura a tracción se produce sin liberación brusca de energía, pero da lugar a superficies de fractura similares a las de compresión para la roca de cantera y monumento (Foto 3).

La resistencia al desgaste por rozamiento (Foto 4) de la roca es menor en la roca de monumento frente a la de cantera (Tabla 2).

5. ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL

Con el fin de conocer la incidencia en la roca de los factores o agentes climáticos y evaluar la tendencia de la misma a debilitarse en sus propiedades se han seleccionado, para su simulación y reproducción en el laboratorio, los ensayos de envejecimiento de resistencia a la humectación-secado, heladicidad y resistencia a la cristalización de sales (V. Durability Test, RILEM, 1980).

La estimación visual de los daños causados por el envejecimiento artificial de la roca de cantera muestra pérdida de

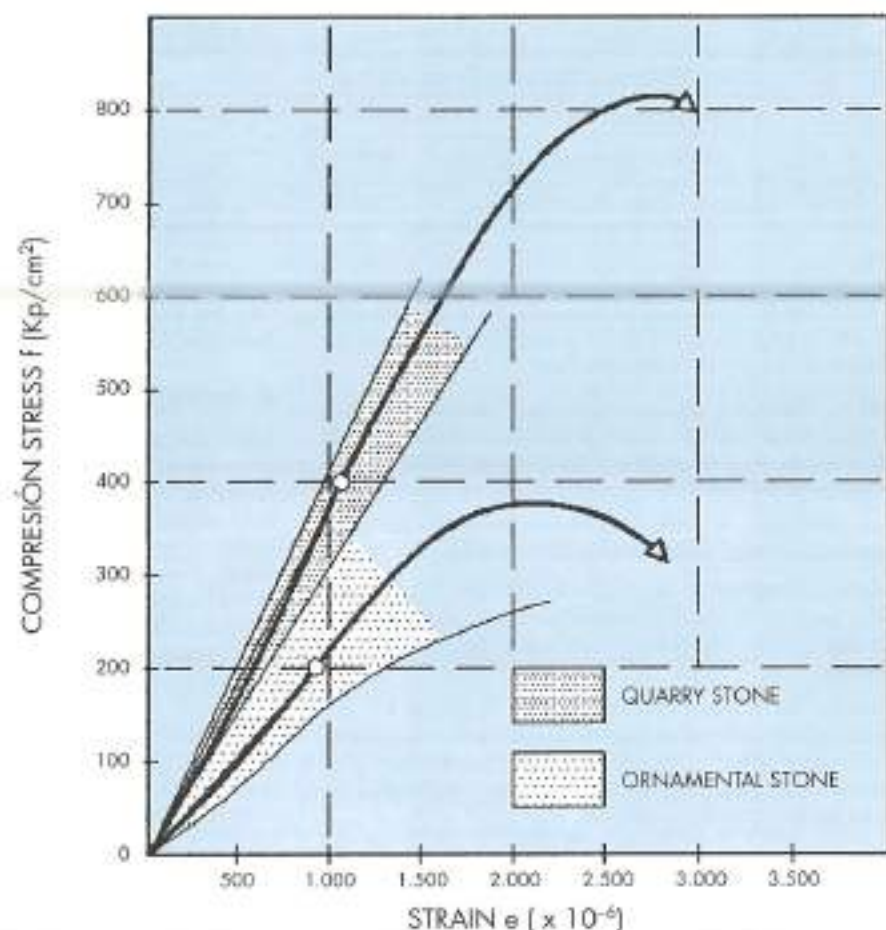


FIGURA 1. Curvas tensión-deformación en compresión (roca de cantera y ornamental).

cohesión interna y desarrollo de algunas morfologías de alteración similares a las observadas en los sillares de los monumentos: arenización-desagregación granular y descamación-desplacación.

Las variaciones en las propiedades hídricas indican modificaciones en el sistema poroso con aumento de diámetro y de la intercomunicación de huecos.

Los resultados obtenidos muestran que el envejecimiento artificial reproduce cambios similares a los observados en la roca a lo largo de su exposición a los agentes ambientales.

6. VALORACIÓN DE LA CALIDAD E ÍNDICE DE CONSERVACIÓN

La propia naturaleza silicea de la roca le proporciona una baja alterabilidad o reactividad potencial desde el punto de vista mineralógico y químico debido a la estabilidad de sus componentes fundamentales: cuarzo, ópalo A y ópalo CT. La ausencia de minerales oxidables, el escaso deterioro que presentan los minerales en el momento de la extracción y su escasa meteorización química potencial debida a su composición química condicionan un bajo Índice de Alterabilidad en la roca del 5,5%.

Estos datos mineralógicos y químicos, unidos a sus características resistentes, que le proporcionan una elevada calidad mecánica, permiten concluir que la piedra monumental

de la ciudad de Zamora es un excelente material de construcción en el momento de su extracción.

La calidad de la roca se ha establecido en base a su buen comportamiento mecánico y a su reducida alterabilidad. Esto es, en definitiva, demostrar su aptitud de respuesta frente a las solicitaciones físicas y químicas que pueden esperarse del entorno durante su futura vida de servicio.

La vida útil de servicio de una piedra monumental es muy dilatada (varios milenios), comparativamente con otros materiales de construcción, pero reducida en relación con las escalas de tiempo geológicas. Por tanto, la roca en el interior de la formación geológica de procedencia representa un patrón de referencia a lo largo de toda la historia de una obra monumental.

Fijando como origen de tiempos para el monumento la fecha de inicio de su construcción y para su sillería la fecha de extracción de cantera, se comienza a desarrollar un proceso histórico de cambios, más o menos acusados, que van a condicionar la durabilidad del material pétreo.

Los cambios experimentados por los distintos parámetros que caracterizan la piedra del monumento serán generalmente desfavorables, de forma que la piedra monumental se irá alejando progresivamente de su referencia de cantera, siendo sus prestaciones menores. Un mantenimiento ideal sería aquel que consiguiera frenar, o reducir al mínimo, el deterioro.



FOTO 1. Rotura de probeta de cantera.

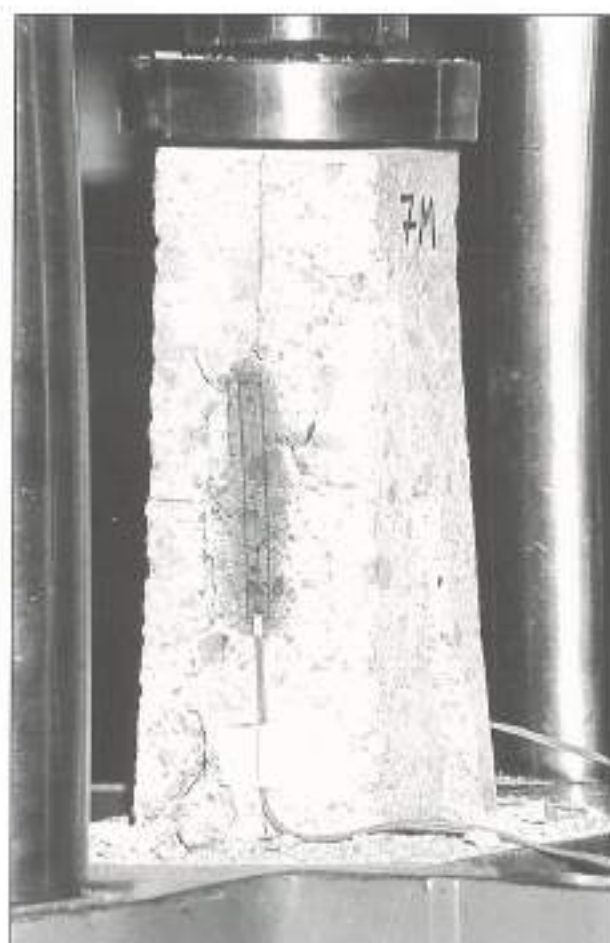


FOTO 2. Rotura de probeta de monumento.

Para cada uno de los emplazamientos de la sillería, dentro del monumento se desencadena un proceso estocástico de ruina. Los parámetros físico-estructurales de la piedra constituyen variables aleatorias que irán evolucionando como funciones del tiempo de vida útil.

La durabilidad de cada zona viene impuesta por la agresividad de los agentes del deterioro. En un determinado momento histórico se observará que en algún emplazamiento la piedra muestra unos valores de los parámetros por debajo de los mínimos admisibles. En tal caso se verá la necesidad de una actuación de reparación o reposición.

Los parámetros físico-estructurales (densidad aparente, porosidad, resistencias mecánicas, etc.), aún siendo variables aleatorias dada la heterogeneidad de la roca, no evolucionan de forma independiente, sino que mantienen de alguna manera una intercorrelación.

Como consecuencia de la correlación que puede establecerse, en un momento histórico determinado, entre los principales parámetros físico-estructurales, se puede seleccionar alguno de ellos (resistencia a flexo-tracción, desgaste, etc.) como indicador del estado de conservación de la piedra. Es conveniente la adopción de métodos no-destructivos que permitan la cuantificación del indicador con el mínimo perjuicio para el monumento.

En un momento histórico dado puede establecerse la correlación entre parámetros, realizando un número adecuado de

ensayos que permitan conseguir una verosimilitud estadística suficiente. En tal caso, un solo indicador nos proporciona información sobre el estado de la piedra. Sin embargo, siempre será más fiable el poder disponer de un estimador ponderado.

En todo caso, bien sea a través de un indicador único o bien de una fórmula ponderada, lo importante es poder determinar el deterioro relativo, o bien el índice de conservación, de la piedra del monumento con respecto a su referencia de cantera.

Como parámetros físico-estructurales de sensibilidad suficiente pueden seleccionarse: densidad aparente (DA), porosidad abierta (PA), módulo de deformación (MD), resistencia a compresión (RC), a tracción (RT) y al desgaste (RD).

Dichos parámetros son representativos de la estructura interna del material, de su deformabilidad y de su capacidad mecánica frente a los esfuerzos y a la abrasión. Son también representativos la densidad real y la resiliencia, pero su sensibilidad frente a las alteraciones es muy reducida por lo que no deben incluirse.

Durante los procesos de deterioro, los parámetros se irán modificando. La durabilidad de la piedra del monumento puede cuantificarse analizando la situación relativa de cada uno de los parámetros de seguimiento, dentro de su intervalo de variación. Cada intervalo de variación tendrá un extremo superior o situación óptima y un extremo inferior o situación pésima (inadmisible para el servicio y que requiere de reparación o reposición).

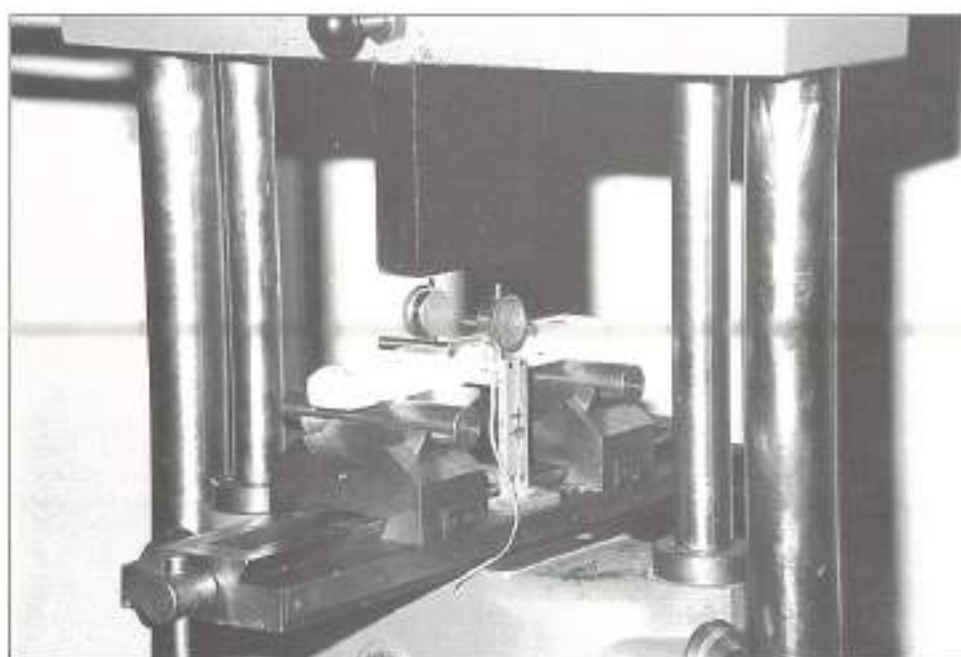


FOTO 3. Ensayo de flexotracción.

En un intento de cuantificar el deterioro de la piedra, desde el momento de su puesta en obra hasta la actualidad, se han seleccionado los seis parámetros de seguimiento. Analizando la situación relativa de estos parámetros dentro de su intervalo de variación se ha cuantificado la durabilidad de la roca mediante un Índice de Conservación. A partir de los parámetros físico-estructurales (Tabla 3) calculados para los sillares de roca sustituidos (muestras de la iglesia de San Ildefonso), y fijando el origen en el momento de la extracción (muestras de la cantera de "El Juncal"), se ha determinado para la roca un Índice de Conservación (I_c).

Si elegimos m parámetros de seguimiento ($K = 1, \dots, m$) de entre los indicados y damos una valoración homogénea V_k para cada uno de ellos (100% para la óptima y 0% para la pésima) podemos definir un Índice de Conservación I_c según la expresión:

$$I_c = \frac{\sum_{k=1}^m V_k}{m}$$

Se va a determinar el Índice de Conservación para la piedra de monumento procedente de la Ciudad de Zamora y para los valores medios de referencia de la roca de cantera. A partir de los valores expuestos en las Tablas 1 y 2, se han determinado las ecuaciones de cálculo correspondientes a cada uno de los parámetros [Número de parámetros; $m = 6$ ($K = 1, \dots, 6$)], y que son las siguientes:

Valoración densidad aparente:

$$V_{DA} = \frac{1.000}{3} (DA - 2)$$

Valoración porosidad abierta:

$$V_{PA} = \frac{25}{3} (8 - PA) + 100$$

Valoración módulo deformación:

$$V_{MD} = \frac{1}{3.500} (MD - 100.000)$$

TABLA 3. Índice de Conservación - Intervalos de variación de los parámetros de seguimiento.

PARÁMETRO	DETERMINACIÓN ÓPTIMA	MEDIA DE CANTERA	MEDIA DE MONUMENTO	DETERMINACIÓN PÉSIMA
Densidad real (g/cm^3)	—	2,56	2,55	—
Densidad aparente (g/cm^3)	2,30	2,25	2,15	2,00
Porosidad abierta (%)	8	11,0	15,8	20
Módulo deformación (Kp/cm^2)	450.000	380.000	220.000	100.000
Resistencia compresión (Kp/cm^2)	1.100	908	420	100
Resistencia tracción (Kp/cm^2)	100	81	45	15
Resistencia desgaste (mm)	2	4,2	7,4	10

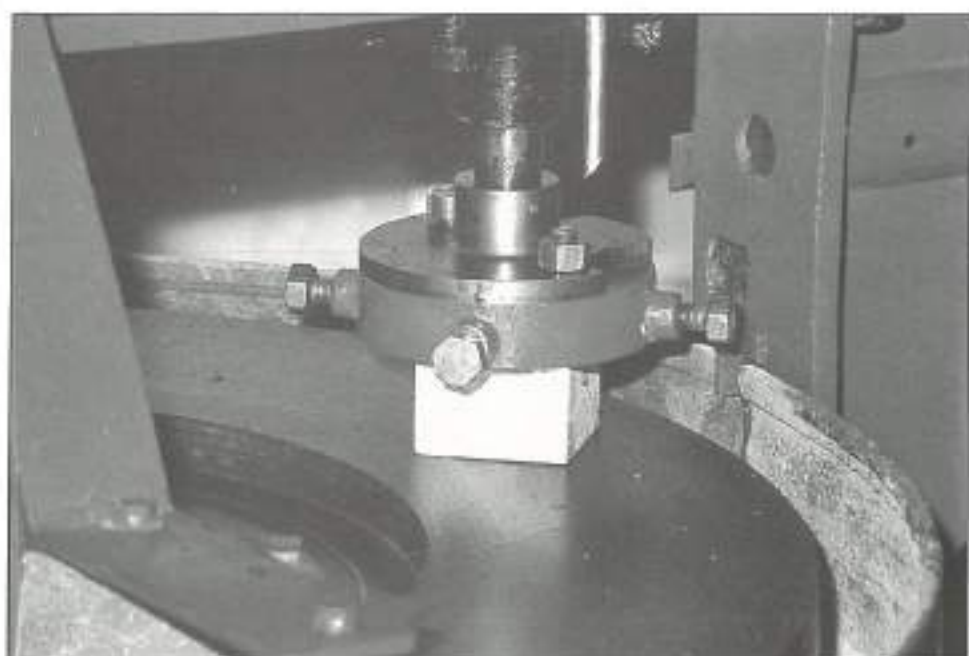


FOTO 4. Ensayo de desgaste en pista.

Valoración resistencia compresión:

$$V_{RC} = \frac{1}{10} (RC - 100)$$

Valoración resistencia tracción:

$$V_{RT} = \frac{100}{85} (RT - 15)$$

Valoración resistencia desgaste:

$$V_{RD} = \frac{25}{2} (2 - RD) + 100$$

A partir de estas ecuaciones, y según los valores experimentales de las seis propiedades o parámetros seleccionados y sus intervalos de variación se obtienen cifras, que reconvertidas a porcentajes, de tal modo que la determinación óptima sea el 100% y la pésima el 0%, obtenemos las valoraciones que nos permiten calcular el Índice de Conservación de la roca de cantera y monumento en el momento actual:

$$I_c(\text{cantera}) = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{n} = \frac{V_{DA} + V_{PA} + V_{MD} + V_{RC} + V_{RT} + V_{RD}}{6} = \frac{83 + 75 + 80 + 81 + 78 + 72}{6} = 78\%$$

$$I_c(\text{monumento}) = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{n} = \frac{V_{DA} + V_{PA} + V_{MD} + V_{RC} + V_{RT} + V_{RD}}{6} = \frac{50 + 35 + 34 + 32 + 35 + 33}{6} = 37\%$$

Para la roca de cantera (muestras de la cantera de "El Juncal") se ha calculado un Índice de Conservación del 78%

Índice de Conservación	Estado de Conservación
75% a 100%	DURABILIDAD ÓPTIMA
50% a 75%	DURABILIDAD ACEPTABLE
25% a 50%	ALTERACIÓN MEDIA
< 25%	UMBRAL DE REPARACIÓN

TABLA 4. Estimación de la durabilidad de la roca.

y para la roca de monumento (sillares de la iglesia de San Ildefonso puestos en obra en el siglo XI) del 37%. Estos valores han sido determinados a partir de los valores medios de los parámetros de seguimiento. Los valores calculados suponen que la roca de cantera presenta una durabilidad óptima y la de monumento ha sufrido un grado de alteración media según la estimación de la durabilidad propuesta en la Tabla 4.

7. INDICADORES MACROSCÓPICOS DE ALTERACIÓN

Los principales indicadores de alteración desarrollados por la roca en los monumentos de Zamora se pueden clasificar en cuatro grupos:

- a) modificaciones superficiales ("pátina naranja" y "pátina negra"),
- b) pérdida de materia (erosión, desagregación granular, arenización y descementación),
- c) rupturas y disyunciones (fisuras, grietas, descamación y desplazación), y
- d) provocados por la actividad de los seres vivos (modificaciones antrópicas, plantas superiores y animales).

La "patina naranja" recubre los sillares como una película. Está constituida por oxalatos cálcicos. Su génesis se atribuye al envejecimiento de antiguos tratamientos protectivos, por lo que puede considerarse como una patina de envejecimiento de origen antrópico. Se conserva en la zona medio-inferior de los muros habiéndose perdido en la zona de capilaridad por desplazación (Añorbe et al., 1993).

La "patina negra", o biológica y de ennegrecimiento, es una combinación de: microorganismos (líquenes y algas verdes filamentosas), sustancias precipitadas (yeso, halita) y depósito húmedo de partículas procedentes de la atmósfera (cuarzo, cenizas volantes). Se desarrolla en las zonas de los edificios donde se produce la acumulación de humedad y preferentemente en las fachadas orientadas al norte.

La erosión se debe a la acción del viento y del agua de lluvia fundamentalmente en fachadas orientadas al suroeste. La descementación, arenización y desagregación granular se deben a tensiones diferenciales debidas a distintos procesos como dilataciones térmicas diferenciales clastos-cemento, que producen microfisuración por fatiga el cemento opalino de la piedra, y se desarrollan en las zonas inferiores de los edificios afectadas por el agua de capilaridad.

Las rupturas son ocasionadas por problemas estructurales o de cimentación de los edificios. Las disyunciones se deben a dilataciones diferenciales en la zona superficial de la roca con diversos mecanismos asociados: termoclastia por insolación, acción cíclica de la humedad y el hielo, y presión de cristalización, hidratación y confinamiento de sales en la

zona inmediatamente inferior a la superficie de los elementos rocosos.

Las modificaciones producidas por los seres vivos, plantas y animales, están condicionadas por su propia actividad vital: excrementos, raíces, etc. La actividad humana es más arbitraria y ocasiona todo tipo de desperfectos por señalización, cableado, vandalismo, etc.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado con la financiación del Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas (CEHOPU) del CEDEX, MOPTMA.

REFERENCIAS

- AÑORBE URMENETA, M.; SÁINZ DE CUETO, F. J. y MARTÍN POZAS, J. M. (1992). "Study of the porosity system of the monumental stone in Zamora (Spain)". Proceedings of 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Vol. 2, 811-818.
- AÑORBE URMENETA, M.; SÁINZ DE CUETO, F. J.; MARTÍN POZAS, J. M. y DIEZ TORRES, J. A. (1993). "Study of patinas on ornamental stone". Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress on the Conservation of Stone and Other Materials, Paris, Vol. 1, 59-66.
- ASTM C-469: Módulo de elasticidad.
- BUSTILLO, M. A. y MARTÍN-SERRANO, A. (1980). "Caracterización y significado de las rocas silíceas y ferruginosas del Paleoceno de Zamora". *Tecniterrae*, 36, 14-29.
- MILLER, R. P. (1965). "Engineering classification and index properties for intact rock". Ph. Thesis, Univ. Illinois.
- MILLOT, G. (1964). "Geologie des argiles". Ed: Masson & Cie, Paris. 499 pp.
- MILLOT, G. (1967). Significance des études récentes sur les roches argileuses dans l'interprétation des faciès sédimentaire. *Sedimentology*, 8, 259-280.
- NORMAL 7/81. "Assorbimento d'acqua per immersione totale/Capacità di imbibizione". CNR-ICR, Roma. 5 pp.
- NORMAL 21/85. "Permeabilità al vapore d'acqua". CNR-ICR, Roma. 5 pp.
- R.I.L.E.M. (1980). Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Commission 25-PEM Protection et Érosion des Monuments. *Matériaux et Constructions*, 13, n° 75, 175-253.
- SOLSA ALARJO, R. (1988). "Notas para una climatología de Zamora". Instituto Nacional de Meteorología, MOPT, Publicación K-62, 45 pp.
- UNE 22-173-85. Granitos ornamentales. Resistencia al desgaste por rozamiento. 3 pp.
- UNE 22-175-85. Granitos ornamentales. Resistencia a la compresión. 2 pp.
- UNE 22-176-85. Granitos ornamentales. Resistencia a la flexión. 3 pp.

INTERGRAPH

presenta soluciones para
INGENIERIA CIVIL



Cortesía de Intergraph: Trazado por clásica, Componentes, Regresión y Libre.



Cortesía de ENDESA: mina de As Pontes. Usuario de sistemas Intergraph.

INGENIERIA DEL TRANSPORTE:

INROADS INRAIL

- Carreteras.
- Autopistas y Autovías.
- Ferrocarriles.
- Aeropuertos.
- Puertos.
- Realineamientos de vía.



Cortesía de SACYR: Autovía del Pinar. Usuario de sistemas Intergraph.

TOPOGRAFIA Y SEGUIMIENTO DE OBRA:

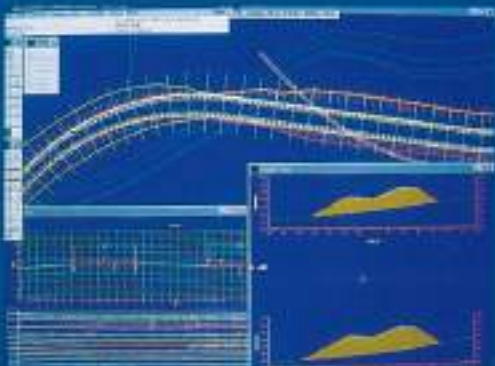
SITEWORKS FIELDWORKS

- Topografía inteligente.
- Soberbios modelos digitales.
- Emplazamientos de obras.
- Canales-Presas.
- Movimientos de tierras.
- Explotaciones mineras.



Cortesía de Intergraph: Plantas, Alzados, Modelos 3D.

Excepcional software
con plataforma
CAD independiente:
MicroStation o AutoCAD
¡Sorpréndase con nuestros precios!



Cortesía de Intergraph: Edición inteligente, Planta y Perfiles.

Para más información contactar con: INTERGRAPH ESPAÑA (91) 372 80 17
o con nuestros distribuidores

INTERGRAPH

SOFTWARE SOLUTIONS
SOFTWARE PARA PROFESIONALES

AISCAD BARCELONA (93) 408 14 36
ALTEK SYSTEM BARCELONA (93) 207 16 12
CADELIN LEON (987) 20 92 84
EASO INFORMATICA BILBAO (94) 424 53 99
MCA INFORMATICA ALICANTE (96) 511 20 44
PROYTE BARCELONA (93) 418 85 06
SERESCO ASTURIANA OVIEDO (98) 523 53 64
INTERCOMPUTER, S.A. ZARAGOZA (976) 44 32 77

Un Servicio Integral para una Calidad Total

OBRAS HIDRAULICAS
•
TRATAMIENTO DE AGUA Y MEDIO AMBIENTE
•
OBRA CIVIL
•
EDIFICACION
•
SERVICIOS MUNICIPALES
•
INSTALACIONES DEPORTIVAS
•
INGENIERIA, TELEMANDO Y CONTROL



JOCA
— INGENIERIA Y CONSTRUCCIONES —



Avda. República Argentina, 24. 1º C.
Torre de los Remedios.
Tels.: (95) 428 41 82-428 38 11.
Fax: (95) 428 37 96. 41011 Sevilla.

Rio Marches, 67.
Poligono Industrial.
Tels.: (925) 23 24 60-23 25 74.
Fax: (925) 23 39 21. 45007 Toledo.

Avda. Sinfarino Madroñero, 24-26.
Tels.: (924) 23 25 08.
Fax: (924) 24 34 51.
06011 Badajoz.

