



Ladrillos

Recomendaciones para el estudio de ladrillos

Los ladrillos son los productos cerámicos más comunes utilizados en nuestro patrimonio arquitectónico. Presentan como denominador común que están fabricados a partir de una materia prima rica en arcilla sometida a un proceso de cocción. En la caracterización de los ladrillos es importante estudiar los factores que influyen en la calidad de este producto y que pueden favorecer o retrasar su deterioro. Hoy en día la producción de ladrillos se ha transformado de arte en ciencia, lo que debería garantizar una producción más homogénea y cualificada. Sin embargo, la sustitución parcial de ladrillos antiguos con otros modernos suele ser en muchos casos inoportuna.

Definición de las condiciones que deben cumplir los estudios previos aplicados a ladrillos

En un estudio de caracterización y evolución de la calidad de los ladrillos implica los siguientes pasos a seguir: caracterización mineralógica y química de la tierra arcillosa que se va a utilizar, conocimiento de la granulometría, la mineralogía de las fracciones arena, limo y arcilla que componen la tierra arcillosa, la composición mineralógica y textural de los ladrillos una vez elaborados, la determinación de sus propiedades físico-mecánicas, las variaciones que presenta este tipo de material en función de la temperatura de cocción elegida y finalmente la evaluación de la durabilidad mediante ensayos de envejecimiento acelerado.

Recommendations for the study of bricks

Bricks are the most common ceramic products used in our architectural heritage. They are all produced from a raw material rich in clay content and subjected to cooking. When characterising bricks, it is important to study the factors that influence their quality and which may favour or delay their deterioration. Today brick production has been transformed from an art to a science. This should guarantee more homogeneous and qualified production. However, the partial replacement of old bricks with other modern bricks is often inappropriate.

Definition of the conditions governing preliminary studies applied to bricks

The study of the characterisation and evolution of brick quality: mineralogical and chemical characterisation of the argillaceous earth to be used; determination of granulometry, mineralogy of sand, lime and clay fractions in argillaceous earth and the mineralogical and textural composition of finished bricks; the determination of their physical-mechanical properties; variations displayed by this type of material according to the selected cooking temperature; and, finally, the evaluation of durability through accelerated ageing tests.

Recomendaciones para el estudio de ladrillos¹

En este capítulo se hablará del estudio y técnicas de caracterización de los ladrillos desde el punto de vista mineralógico, textural y físico-mecánico así como de la resistencia al deterioro.

Todos los materiales cerámicos tradicionales presentan como denominador común el hecho de estar fabricados a partir de una materia prima rica en arcilla y sometidos a un proceso de cocción.

Los ladrillos son los productos cerámicos más comunes utilizados en nuestro patrimonio arquitectónico. Su empleo viene caracterizado por tener costes bastante bajos, por su resistencia a la humedad y al calor, y porque pueden ser en algunos casos más duraderos que la piedra.

En la caracterización de los ladrillos es importante estudiar los factores que influyen en la calidad de este producto y que pueden favorecer o retrasar su deterioro. Las variables a tener en cuenta son numerosas: la materia prima arcillosa, su mineralogía y quimismo, la presencia o no de aditivos, la temperatura de cocción y las condiciones atmosféricas del horno. La variación de estos parámetros da lugar a piezas de diferente porosidad, color y resistencia mecánica y, en resumen, a ladrillos más o menos duraderos.

Hoy en día la producción de ladrillos se ha transformado de arte en ciencia, y, por lo tanto, se debería garantizar una producción más homogénea y cualificada. Sin embargo, no es difícil encontrar ladrillos de muchos siglos de edad que siguen manteniéndose en perfecto estado, mientras que otros actuales se deterioran en pocos años. Por otro lado, la sustitución parcial de ladrillos antiguos con otros modernos podría ser inoportuna, dado que se introducen elementos con características físico-químicas diferentes, sobre todo en lo que se refiere a la porosidad.

Según la norma UNE 67019 EX/96, el ladrillo de arcilla cocida es una pieza generalmente ortoédrica, utilizada en la construcción, cuya dimensión máxima es igual o inferior a 29 cm. Las dimensiones y forma del ladrillo deben ser especificadas de acuerdo con las normas

UNE 67-030-85/85 o la más reciente UNE-EN 771-1/03. A lo largo de los siglos, la forma, el tamaño, y la calidad de los ladrillos han ido cambiando gracias al perfeccionamiento de la técnica de fabricación y a los adelantos tecnológicos.

A continuación se resumen las etapas más significativas de la evolución de este producto cerámico como elemento de construcción así como de los tipos de hornos que se han ido empleando para su producción a lo largo de la historia.

Historia del ladrillo

El uso del ladrillo para las construcciones de albañilería es muy antiguo, siendo característico, especialmente en la antigüedad, de las poblaciones que vivían en llanuras debido a la escasez de material rocoso. De hecho, la primera civilización que desarrolló la industria cerámica fue la mesopotámica, que surgía entre los ríos Tigris y Éufrates, y donde la materia prima más abundante en sus suelos era la arcilla y la arena. Sus primitivas construcciones estaban hechas de adobe (arcilla cruda y secada al sol) al que se le solía añadir paja y arena para evitar retracciones y agrietamientos durante el secado.

Sólo más tarde se empezó a utilizar el verdadero ladrillo, y como era más difícil y más costoso de obtener, se reservaba para los revestimientos exteriores y para las construcciones de lujo. Entre las realizaciones más antiguas y famosas destaca el Zigurat “Etemenanki”, edificio religioso, construido por Nabucodonosor II alrededor del 600 a.C.

En Asiria, aunque había buenas canteras de piedra, se empleó mucho el adobe por la facilidad de ejecución y por la influencia de la vecina Caldea. Los grandes palacios de Sargon en Khorsabad y de Assur-nazir-pal, en Nimrud, muestran el uso del adobe, algunas veces revestido de piedra. En cuanto a la técnica de construcción, los adobes se colocaban en obra todavía húmedos, y por presiones se unían de tal modo que hoy aparecen como masas homogéneas, más que como construcciones de fábricas aparejadas.

Paralelamente, en América central la cultura olmeca (del año 1500 a.C. al 200 d.C.) utilizó el ladrillo de manera esporádica. Aunque relegado a un segundo plano con respecto a la piedra y adobe, el ladrillo tuvo función constructiva tanto en algunos muros como para edificar pisos (Cholula, desde el 200 al 700 d.C.). La expresión más sobresaliente es Comalcalco, perteneciente a la civilización maya. Se recurrió al ladrillo, moldeado en amplia variedad de formas, para la construcción de muros, pilastras y bóvedas de templos y palacios.

En Europa, la técnica de construcción en ladrillos continuó en las civilizaciones de Egipto, Grecia y Roma. En Egipto, se utilizó el ladrillo en obras de ingeniería como bóvedas de canales. El limo negro del Nilo proporcionaba la materia prima para el ladrillo y con ella se levantaron las murallas de El-Kab, pertenecientes al antiguo imperio así como el núcleo de algunas pirámides.

Se dispone de escasa información sobre el uso del ladrillo en la civilización griega, aunque es lógico pensar que la arquitectura popular se realizase en barro, por el reducido costo y su rapidez de ejecución. Hay sólo algunos ejemplos como el templo de Apolo en Megara o el pórtico de Kotros en Epidauró.

El hábito de construir muros con ladrillo empezó en la civilización romana durante la edad de Augusto y se empleó sin interrupción hasta el final del imperio. En el segundo de sus diez libros sobre la arquitectura, Vitruvio trata largamente de este material. Explica el proceso,

desde el tipo de tierra a emplear y las dimensiones que se suelen utilizar. La diferencia fundamental entre la arquitectura de la Antigua Grecia y la de Roma era el extenso uso del mortero de cal como ligante entre las piezas de ladrillo. Dicho material era mucho más fuerte que el barro y más duradero que el yeso.

El periodo prebizantino y bizantino acentuó esta tendencia arquitectónica como se puede observar en las iglesias de Salónica, Rávena y Constantinopla, introduciendo también decoraciones geométricas en diente de sierra o en otras formas especiales. Las construcciones de ladrillo bizantino, unidos por excelentes morteros, las bóvedas especialmente, fueron las más importantes hechas por el hombre, por la ingeniosidad de aparejos, facilidad de ejecución, solidez constructiva y, a la par, ligereza y esbeltez.

Los musulmanes fueron los propagadores de las arquitecturas de ladrillo por todos los países que conquistaron y supieron conferir valor de arte a las obras de ladrillo, con la creación de geometrías como la forma de espina de pez o las ménsulas escalonadas. El sepulcro de Jusuf Kutaijir en Nachtschevan (Mongolia) y la mezquita de Mosal (Persia) son magnos ejemplares de la arquitectura de ladrillo mahometana.

También la cultura cristiana desarrolló, especialmente en Europa, grandes obras hechas con ladrillos. En todo el continente, es típico de los primeros siglos de la Edad Media la reutilización de ladrillos procedentes de edifi-



1. Iglesia de Santa Sofía. Estambul. Imagen: Martín J. Fernández

cios en ruina o almacenados, de modo que los materiales no resultaban homogéneos ni en color ni en tamaño, por lo que el aparejo del muro presentaba espesores irregulares de mortero. Por otra parte, los ladrillos que se fabricaban eran de mala calidad; durante el siglo XI, volvió el interés hacia los trabajos de construcción, con lo que la calidad de estos materiales fue mejorando hasta el final de la Edad Media.

En Italia, el arte del ladrillo se desarrolló principalmente en el norte, desde el siglo XI, reproduciendo con el ladrillo lo que se hacía en piedra con el arte Románico. Así se ven muchos ejemplos en Milán, Bolonia y Pavia. Durante el período lombardo y gótico, la construcción en ladrillos se hacía a veces más variada por el uso de una estratificación alternada con hiladas de piedra o dibujos más complejos (iglesias de S. Ambrogio en Milán y San Francesco en Pavia), hasta que en los siglos XIV y XV llegó a ser normal el uso de terracotas ornamentales.

En Francia, donde la piedra era abundante, la arquitectura del ladrillo se desarrolló menos; tan sólo en una parte del Languedoc, donde la piedra faltaba, tuvo importancia desde el siglo XII. Iglesias como San Saturnino (siglo XII) y la de los Jacobinos, de Toulouse, son de ladrillo. En el Renacimiento el ladrillo se combinó con la piedra porque no era un material apto para las filigranas escultóricas de ese estilo.

Los mejores ejemplares de obra de ladrillo en Alemania son del siglo XV y XVI y abundan principalmente en el norte.

Con habilidad extraordinaria, imitaron las formas ojivales de piedra, llegando a elevar obras como Santa Catalina, la Casa del Ayuntamiento de Brandeburgo y muchas casas e iglesias de Rostock, Munich y otras ciudades.

De Inglaterra se conocen edificaciones de ladrillo en estilo románico del siglo XIII, como la abadía de San Albano. En el siglo XV se hicieron muchas y muy hermosas: las partes más antiguas del palacio de Saint James y de Hampton Court son de ladrillo.

En España, del arte musulmán nació el mudéjar español. Esa arquitectura tuvo predilección por el ladrillo en el siglo XIII y más en los XIV y XV dejando obras preciosas en Toledo (Santiago del Arrabal y Puerta del Sol) y en Aragón (las Torres de Teruel y San Pedro de Calatayud).

A partir del siglo XVIII, en Europa, la complejidad y habilidad en la arquitectura y las mejoras técnicas introdujeron una considerable precisión en la manufactura y uso de ladrillos. Esta mutación se reflejó en la producción de material de elevada calidad, de color uniforme, de perfil cuidado, más consistente, mejor cocido y de un acabado esmerado.

Tipos de hornos y combustibles

Muy poco se conoce sobre las primitivas técnicas de moldeo y cocción de los ladrillos. Los primeros hornos aparecen en Mesopotamia alrededor del 4500 a.C. Se



2. Puertas de Istar, Babilonia (Museo de Pérgamo, Berlín)

sabe también que los egipcios construían hornos desde la antigüedad. La antigua técnica de fabricación del ladrillo por medio de moldes de madera se ha conservado en sus aspectos esenciales hasta nuestros días, pero el desarrollo de nuevos diseños de piezas se ha producido en tiempos recientes.

Con la evolución de la tecnología se modificó también el tipo de horno para la cocción de los ladrillos. Los hornos primitivos consistían en un muro circular bajo con un suelo de ladrillo cocido, con aberturas para los fuegos. La parte alta, que se reconstruía para cada cocción, era una capa de arcilla y paja empastadas sobre los materiales cerámicos crudos, dejando aberturas para el tiro. Los romanos utilizaron una variante de este horno, que consistía en poner en el nivel inferior la cámara de combustible, sobre la que se apoyaba una cámara hecha de ladrillo cocido. Aquí se disponían los ladrillos crudos y se cocían a temperaturas cercanas a 1000 °C. Los ladrillos obtenidos no conseguían una cochura uniforme, ya que los situados en los extremos de la cámara estaban poco cocidos, mientras que los del interior podían agrietarse por el excesivo calor.

El paso siguiente fue el horno periódico o intermitente que posee un revestimiento interior de un refractario adecuado y otro exterior de ladrillo. Se colocan las piezas en el horno, y a continuación se calienta éste gradualmente, se mantiene a la temperatura máxima durante un cierto período y se deja enfriar. El principal problema de los hornos periódicos es la pérdida de calor durante el enfriamiento y la gran cantidad de combustible necesario para calentar la estructura con cada carga de material.

Los hornos continuos como los de Hoffmann aprovechan el calor residual desprendido durante el enfriamiento. Consisten en una serie de hornos intermitentes conectados en circuito. Se regula la circulación de aire de forma que pase primero a través de las piezas que ya se han cocido y se están enfriando y, a continuación, una vez caliente, pasa al horno que se encuentra en fase de cocción. Los gases residuales calientes pasan sobre las piezas que se encuentran próximas a la cocción, precalentándolos, de forma que éstas precisen una menor cantidad de combustible en la cocción. El principio fundamental es que la fuente de calor se mueve y los ladrillos permanecen estáticos. En los hornos de túnel ocurre el proceso inverso. Una estructura en túnel mantiene distintas zonas a temperaturas constantes y diferentes, que se corresponden con el programa de cocción. Las piezas avanzan a su través sobre vagones.

Con el paso del tiempo ha variado también el tipo de combustible. Antiguamente, cuando el ladrillo estaba hecho a mano, la cocción se llevaba a cabo mediante el uso de pilas de leña seca. Térmicamente la madera es ineficiente por su moderado poder calorífico con respecto a su elevado volumen. Cuando comenzaron a aplicarse métodos más modernos de cochura, surgió el problema del azufre. El cambio desde el empleo de madera a la utilización de turba, lignito y hulla que contienen azufre (0,5-3%) dio lugar a ladrillos de menor resistencia a los agentes atmosféricos además de variar la coloración de las piezas por combinación de los carbonatos con el azufre.

El empleo de combustibles gaseosos presenta grandes ventajas sobre el de combustibles sólidos porque

Tabla 1. Tipos de arcillas utilizadas para diferentes materiales cerámicos

Cerámica de mesa	Porcelana	Caolín y arcillas caoliniticas
	Lozas	
	Azulejos	Arcillas ilitico-cloriticas
	Cerámica de cocina	
Cerámica sanitaria	Cerámica sanitaria	Caolín y arcillas caoliniticas
Revestimientos	De pasta blanca	Caolín y arcillas caoliniticas
	De pasta roja	Arcillas ilitico-cloriticas
	Cocidos una vez	
	Cocidos dos veces	
Ladrillos	Terracota	Arcillas ilitico-cloriticas

puede ser controlada la combustión con mayor facilidad. La llegada de combustible al quemador es continua en lugar de verificarse por alimentación intermitente y se controla automáticamente. Además, la limpieza es mucho mayor tanto en el interior como en el exterior del horno. El gas natural, que usualmente está asociado con depósitos de petróleo, tiene con frecuencia una proporción muy baja de SO_2 con respecto a otros tipos de gases, por lo que la contaminación atmosférica es menor.

La electricidad constituye la fuente de calor más limpia y más fácilmente controlable. La eficiencia térmica de un horno calentado eléctricamente es aproximadamente el doble que la de cualquier otro tipo, pero este único hecho no compensa su elevado coste por unidad. El calentamiento difiere fundamentalmente de las otras fuentes de calor. Mientras que los combustibles dependen de la energía química generada por combustión, el calentamiento eléctrico se debe a las propiedades físicas de la resistencia.

Tipos de ladrillos

Los materiales cerámicos presentan tal variedad que es difícil realizar una clasificación, ya que, como es lógico, se pueden adoptar distintos criterios que conducen a distintas clasificaciones. Fabbri (1988), sintetizando las ideas de otros autores, reúne los productos cerámicos en tres categorías en función de la composición química y mineralógica: materiales cerámicos silicatados, fabricados a partir de arcillas u otros silicatos; materiales cerámicos con óxidos de tipo simple y complejo; materiales cerámicos con elementos y compuestos sin oxígeno.

Los tres grupos se pueden dividir ulteriormente en base a la granulometría de los componentes. Se puede ofrecer, también, un criterio alternativo de clasificación, considerando las propiedades y sus aplicaciones: productos cerámicos tradicionales (con funciones estéticas, estructurales, ornamentales y domésticas); productos cerámicos especiales (con funciones mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas, biológicas y nucleares).

En la tabla 1 se recoge la clasificación de la cerámica tradicional propuesta por Fabbri (1998).

De acuerdo con la norma UNE 67019 EX/96, las caras de los ladrillos reciben los siguientes nombres:

tabla, la cara mayor, *canto*, la cara intermedia, y *testa*, la cara menor.

Las aristas se suelen designar con los siguientes nombres: *soga*, la arista mayor, *tizón*, la arista intermedia, y *grueso*, la arista menor.

Según el Pliego RL-88 (1988) y la norma UNE 67019 EX/96, se establecen tres tipos de ladrillo: *macizo* (desde totalmente macizo hasta un volumen de taladros en tabla no superior al 10%), *perforado* (con un volumen de taladros en tabla superior al 10%) y *hueco* (con taladros en canto o en testa).

Las formas de los ladrillos (divididos en piezas de baja y alta densidad) se recogen en la norma UNE-EN 771-1/03.

Los constituyentes de cualquier material cerámico son: *matriz* (es el material plástico), *degrasantes* (o inclusiones, disminuyen la plasticidad del material cerámico, evitan retracciones y reducen el tiempo de secado, aumentando la resistencia mecánica del producto final), *fundentes* (rebajan el punto de fusión), *colorantes* y *cubiertas* o superficies de acabado (barnices, esmaltes, engobes).

En la matriz, las fracciones más finas están constituidas por minerales de sílice, silicatos y aluminosilicatos: ilita, clorita, caolinita, micas y cuarzo. En la fracción más gruesa se encuentran proporciones variables de cuarzo, mica, calcita, dolomita, feldespatos y yeso, como minerales mayoritarios, y también pirita, siderita, hematites, magnetita, en cantidades más pequeñas. Es posible encontrar cantidades generalmente reducidas de materia orgánica y de sales solubles.

Los materiales degreasantes más empleados son la sílice, generalmente en forma de cuarzo, feldespatos, chamota, y en algunos casos, calcita. Los materiales fundentes típicos son los carbonatos, sulfatos y boratos sódicos, feldespatos potásicos y sódicos.

Objetivos

Los ladrillos pueden ser muy diferentes entre ellos dependiendo, sobre todo, del tipo de material arcilloso elegido y de la temperatura que se ha aplicado para su cocción. Esta premisa sugiere que un estudio de carac-

terización y evolución de la calidad de los ladrillos implica los siguientes pasos a seguir:

En primer lugar, la caracterización mineralógica y química de la tierra arcillosa que se va a utilizar para la fabricación de los ladrillos mediante difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X. Es también útil conocer la granulometría y, a continuación, la mineralogía de las fracciones arena, limo y arcilla que componen la tierra arcillosa. Posteriormente, es necesario el estudio de la composición mineralógica y textural de los ladrillos cocidos utilizando la microscopía óptica de polarización y la microscopía electrónica de barrido. El paso siguiente consiste en el estudio de las propiedades físico-mecánicas de los ladrillos y sus

variaciones en función de la temperatura de cocción elegida. Las técnicas de ensayo más comunes son la porosimetría de inyección de mercurio, los ensayos hídricos (absorción, desorción y capilaridad), los ultrasonidos y los ensayos mecánicos. A estas técnicas se puede añadir el uso de la colorimetría para cuantificar numéricamente las variaciones cromáticas de los ladrillos en base a la materia prima y/o aditivos que se han añadido y a la temperatura de cocción elegida.

Finalmente, para evaluar la durabilidad de estos materiales, se suelen llevar a cabo ensayos de envejecimiento acelerado (ciclos de cristalización de sales, de hielo-deshielo y de humedad-sequedad).

Tabla 2. Resumen de las técnicas de estudio aplicadas a los ladrillos y los resultados que pueden proporcionar

TÉCNICA ANALÍTICA	RESULTADOS EN LADRILLOS
Granulometría	> Tamaño de las partículas de la materia prima
Fluorescencia de rayos X	> Quimismo de la materia prima
Difracción de rayos X	> Mineralogía de la materia prima y del producto cocido. Transformaciones mineralógicas a distintas temperaturas de cocción. Porcentaje de las fases minerales presentes
Microscopía óptica	> Mineralogía y textura del ladrillo. Tipo, tamaño y cantidad de degasante. Porcentaje de poros y/o fisuras
Microscopía electrónica de barrido	> Textura del ladrillo, su grado de vitrificación y unión entre las partículas
Ensayos hídricos	> Grado de interconexión entre los poros del ladrillo. Capacidad de absorción por inmersión, por capilaridad y de desorción de agua. Determinación de los valores de densidad y porosidad
Porosimetría de inyección de mercurio	> Rango de los poros del ladrillo. Determinación de los valores de porosidad, densidad y área específica
Ensayos mecánicos	> Resistencia a la compresión y flexotracción del ladrillo
Ultrasonidos	> Constantes elásticas e índices de anisotropía del ladrillo
Colorimetría	> Valores de cromaticidad y luminosidad del ladrillo
Ensayos de durabilidad	> Resistencia del ladrillo a la acción de las sales, heladicidad, humedad y atmósferas contaminadas

Tabla 3. Transformaciones mineralógicas en los ladrillos tras la cocción

FASE MINERAL	TEMPERATURA DE COCCIÓN
Filosilicatos	> Indican una temperatura de cocción comprendida entre 700 y 900 °C para la fase deshidratada de la illita (o moscovita)
Dolomita	> Desaparece alrededor de 700 °C
Calcita	> Se descompone entre 700 y 900 °C
Sanidina	> Se forma a partir de la ortosa a temperaturas superiores a 900 °C
Gehlenita	> Aparece sólo en ladrillos con carbonatos a 800 °C, disminuyendo fuertemente sus cantidades alrededor de los 1000 °C
Dióxido y Wollastonita	> Se empiezan a generar en muestras con carbonatos ya a 800 °C (en muy bajas concentraciones, y detectados sólo por SEM-EDX), como bordes de reacción entre carbonatos y silicatos. Aumentan sus proporciones conforme sube la temperatura de cocción desarrollando estructuras "digitadas". Permanecen a 1100 °C
Mullita	> Aparece a temperaturas superiores a 800 °C y aumenta en concentraciones conforme crece la temperatura de cocción
Anortita	> Se forma a temperaturas mayores de 1000 °C únicamente en las muestras ricas en carbonatos
Vidrio	> La fase vítrea prevalece en los ladrillos con carbonatos hasta los 900 °C. A temperaturas más altas, las cantidades de fundido son más abundantes en los ladrillos fabricados a partir de tierras arcillosas sin carbonatos

Un estudio detallado permite al investigador llegar a tener una idea bastante fiable del grado de calidad de los ladrillos, ya sean materiales de construcción o de decoración de edificios históricos o bien procedentes de una industria ladrillera, con el fin de poder mejorar su nivel de producción y calidad.

Campo de aplicación

Como se ha comentado anteriormente, los ladrillos pueden variar mucho en cuanto a composición y propiedades físico-mecánicas. Considerando que se trata de materiales de construcción que se encuentran en numerosos edificios históricos, su estudio es muy posible que tenga que englobar la caracterización de los ladrillos desde el punto de vista mineralógico, petrográfico y físico-mecánico; la evaluación de su estado de conservación; el análisis de las causas y procesos que generan su deterioro; así como una posible intervención mediante sustitución de piezas o aplicación de productos de consolidación y/o hidrofugación.

En este proceso debe tenerse en cuenta, además, las características de los materiales de construcción que rodean a las piezas cerámicas dañadas para evitar introducir cambios sustanciales en el sistema poroso así como en la resistencia mecánica del conjunto constructivo.

Definición de las condiciones que deben cumplir los estudios previos aplicados a ladrillos

Dado que la calidad de los ladrillos depende principalmente de la materia prima arcillosa, de su granulometría y de la temperatura de cocción que se aplique, es fundamental conocer su mineralogía así como la textura de estos materiales, además de determinar las características de su sistema poroso. Todos estos datos permitirán averiguar la calidad de estos materiales así como establecer conocimientos de la tecnología empleada en su fabricación (tabla 2).

A continuación se describen los resultados genéricos que proporcionan diferentes técnicas analíticas aplicadas al estudio de los ladrillos.

Mineralogía

Tras la cocción de los ladrillos, se verifican importantes cambios mineralógicos y texturales (ver figura 10, página 41), que se interpretan en función de los marcados disequilibrios de un sistema que se parece, a pequeña escala, a los procesos metamórficos de alta temperatura (por ejemplo, aureolas de contacto en el pirometamorfismo). En estas condiciones, un calentamiento rápido determina una anticipación en la reacción mineral, impidiendo la formación de fases estables y favoreciendo la formación de fases metaestables.

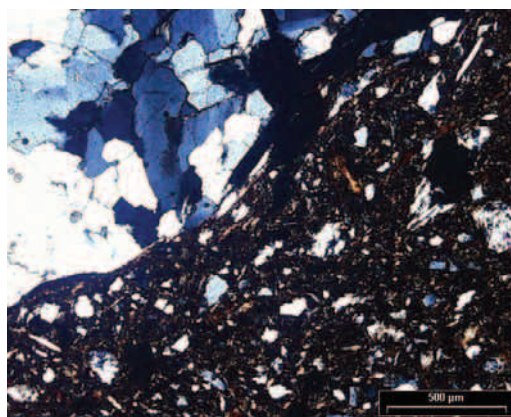
La mineralogía de la materia prima arcillosa de partida y de los ladrillos puede determinarse fácilmente mediante el uso de la microscopía óptica y la difracción de rayos X. Estas técnicas permiten deducir cuáles son las transformaciones mineralógicas que ocurren en los ladrillos tras la cocción a alta temperatura. Entre ellas se incluye el colapso de la estructura del feldespato potásico de baja temperatura (microclina u ortosa) y su transformación parcial en sanidina, así como la formación de silicatos de aluminio (mullita) más sanidina a costa de la moscovita y/o ilita, a temperaturas mayores o iguales a 800 °C (RODRÍGUEZ NAVARRO et al., 2003). En el caso en que estén presentes los carbonatos en la tierra arcillosa, se produce una fusión parcial, seguida por el desarrollo de determinados silicatos de Ca (y Mg) de alta temperatura: gehlenita, wollastonita, dióxido y anortita

que se forman mediante la combinación de procesos de transporte de masa (flujo viscoso) y procesos de reacción-difusión (CULTRONE et al., 2001a). La presencia de unos o de otros minerales nos permite elucidar acerca de la temperatura de cocción alcanzada en el horno.

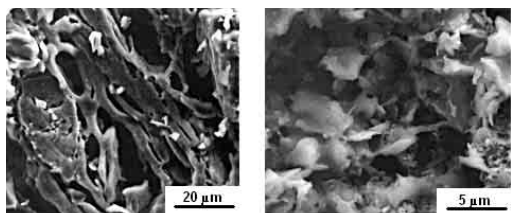
En la tabla 3 se resumen las principales modificaciones mineralógicas que sufren los ladrillos tras la cocción.

Textura

Los ladrillos se caracterizan por ser cuerpos de elevada porosidad (15–40%). Los valores más altos (30–40%) corresponden a ladrillos utilizados en los edificios históricos (PAVÍA SANTAMARÍA, 1994) debido principalmente a los procesos de fabricación tradicionales. Por el contrario, los productos de gres presentan valores de poro-



3. Imagen al microscopio óptico de un ladrillo cocido a 950 °C. Los filossilicatos están ligeramente orientados debido a la compresión durante el amasado de la tierra arcillosa



4. Observación de la textura de un ladrillo a través del SEM. Ladrillos sin carbonatos (izquierda) y con carbonatos (derecha) cocidos a 1000 °C

sidad próximos a cero, debido a la selección de las materias primas y a la temperatura de cocción (WARREN, 1999). Si se considera esto último, generalmente los productos cocidos a elevada temperatura son los más vitrificados, por lo que sufren las mayores variaciones de tamaño y las más fuertes modificaciones del sistema poroso (DELBROUCK et al., 1993).

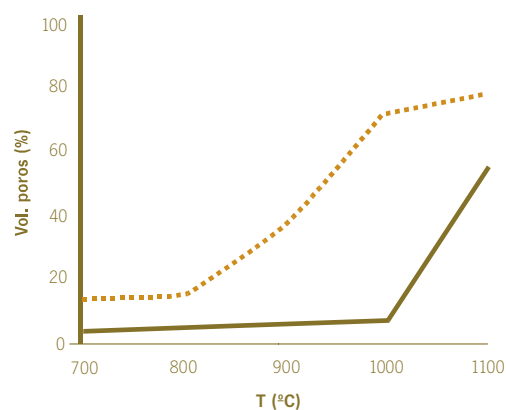
Para el estudio textural de los ladrillos se recurre a la microscopía óptica de polarización (figura 3) y a la microscopía electrónica de barrido. Mediante esta última técnica se pueden visualizar la morfología de los poros y fisuras, así como su desarrollo y tamaño en los ladrillos (figura 4). A bajas temperaturas de cocción (700-900 °C), los poros de los ladrillos presentan morfología angulosa y superficie rugosa. A 1000 °C, dependiendo de la composición mineralógica de la tierra arcillosa, se pueden observar poros más redondeados, dando lugar a lo que se conoce como “estructura celular” (TITE y MANIATIS, 1975) y un elevado grado de vitrificación de la superficie. Este fenómeno se ve menos acentuado en presencia de carbonatos ya que estos minerales rebajan la temperatura de inicio de vitrificación de las arcillas y la textura desarrollada es estable durante un amplio intervalo de temperaturas. Es, por tanto, necesario alcanzar una temperatura más alta (aproximadamente 1100 °C) para tener una superficie vitrificada continua.

Caracterización del sistema poroso

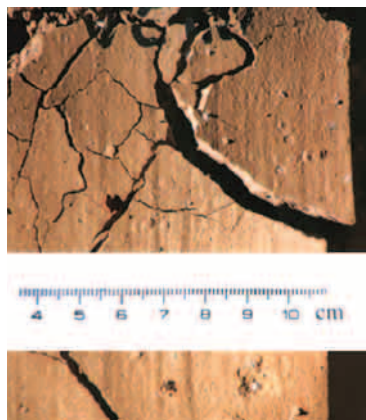
Las propiedades hídricas ayudan a entender el comportamiento de los materiales cerámicos frente a los

fluidos, y la forma de absorber o de evaporar dichos fluidos. Dado que en la mayor parte de los casos los procesos de alteración dependen de la entrada y circulación de agua en el interior de los materiales porosos (CHAROLA Y LAZZARINI, 1986), los ensayos hídricos resultan de gran importancia para valorar su durabilidad (ver página 61). Existen normas específicas para ladrillos que controlan la metodología de estudio de sus propiedades hídricas (UNE 67-027-84; UNE-EN 772-4/99; UNE-EN 772-3/99; UNE-EN 772-7/99; UNE-EN 772-11/01; UNE-EN 772-13/01), aunque pueden aplicarse también las mismas que se usan para la piedra (NORMAL 7/81; NORMAL 29/88; NORMAL 15/95).

La capacidad de absorción de agua por parte de los ladrillos suele disminuir al aumentar la temperatura de cocción. Este parámetro hídrico no sigue esta pauta si los ladrillos están hechos a partir de una tierra arcillosa rica en carbonatos. En efecto, pueden registrarse los valores más altos de absorción entre 800 y 1000 °C, por el desarrollo de fisuras en las piezas y la formación de un cierto volumen poroso fruto de la transformación del CaCO_3 y/o $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ a CaO y su posterior hidratación a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que conlleva un incremento de volumen que da lugar a tensiones internas y fisuraciones. El hecho de que a 700 y a 1100 °C estos ladrillos presenten valores más bajos de absorción de agua se debe a la ausencia de fisuras y microporos, ya que a 700 °C no se ha alcanzado todavía la temperatura de transformación de los carbonatos a óxido de calcio (y óxido de magnesio) mientras que a 1100 °C el elevado grado de vitrificación contrarresta la fuerza de expansión ejercida por la portlandita y, además, se ha producido la sinterización del



5. Volumen de los poros mayores de 1 μm en ladrillos sin carbonatos (línea discontinua) y con carbonatos (línea continua) con respecto a la temperatura de cocción



6. Típico aspecto de desmoronamiento de los ladrillos por transformación de los granos de calcita en portlandita (rotura por caliche)

CaO (que, por tanto, no puede hidratarse fácilmente). Comparando valores de absorción libre y absorción forzada de agua, es evidente, además, una escasa conectividad entre los poros cuando los ladrillos están cocidos a 1100 °C, debido a la formación de una elevada cantidad de fundido.

Otra técnica que se suele emplear en el estudio del sistema poroso de los ladrillos es la porosimetría de inyección de mercurio que informa sobre la distribución de los diferentes tamaños de los poros existentes en la cerámica. Mediante esta técnica se suele observar un desplazamiento hacia poros de radio de acceso más grande conforme sube la temperatura de cocción (figura 5).

Resistencia mecánica

De la misma forma que para los materiales pétreos, en los ladrillos se cumple que cuanto menor es el tamaño de grano del material cerámico, mayor es su resistencia mecánica y, también lo contrario, ésta disminuye con el aumento del volumen poroso. La resistencia a la compresión depende directamente de las propiedades físicas de las arcillas, de los métodos de fabricación y del grado de cocción (DONDI et al., 1999). Se ha observado también que el desarrollo de vidrio en los ladrillos cocidos a elevadas temperaturas favorece el alcance de las resistencias mecánicas más elevadas (CULTRONE et al., 2004).

Los ensayos que se llevan a cabo con más frecuencia son los de resistencia a compresión y a flexión. Para efectuarlos se pueden seguir las normas UNE-EN 1052-1/99 y 1052-2/00 para fábricas de albañilería donde se especifican los tamaños y el número de probetas mínimo a ensayar y la forma de evaluar los resultados.

También los ultrasonidos pueden aportar informaciones valiosas sobre el comportamiento elástico y mecánico de los ladrillos, especialmente si se quiere estudiar la evolución de los ladrillos con el paso del tiempo, cuando sufren un deterioro progresivo como el causado por la cristalización de la portlandita en ladrillos con carbonatos en su materia prima (CULTRONE et al., 2001b), fenómeno bastante común y que se conoce como “rotura por caliche” (figura 6). La correcta determinación de la presencia de estas inclusiones calcáreas se lleva a cabo mediante la norma UNE 67-039-93/93.

La técnica de ultrasonidos puede ayudar también a averiguar el grado de anisotropía alcanzado por los ladrillos. La anisotropía se reduce al aumentar la temperatura de cocción; este hecho parece lógico si se asume que, a altas temperaturas, los filosilicatos, que son las fases minerales que van a originar mayores orientaciones preferenciales, se transforman en otras fases minerales que, o bien no son de hábito laminar (mullita), o son isotropos (fundido).

Color

La colorimetría permite medir y expresar el color de forma cuantitativa en base a la cantidad de la luz reflejada por una superficie analizada. La colorimetría surge con la teoría tricromática de la visión de los colores, que establece que pueden elegirse tres colores primarios X, Y, Z de forma tal que, combinados en diversas proporciones, puedan igualar a cualquier color desconocido. Por lo tanto, la colorimetría consiste en la designación de los tres primarios y en la determinación de la cantidad de cada uno de ellos que debe emplearse para reproducir el color requerido. Mezclas por igual de los tres colores básicos reproducen el blanco. El sistema de colorimetría más utilizado es de la Comisión Internationale de l'Eclairage (CIE). Los colores primarios, en este sistema, no se manejan como colores reales, son simplemente tres funciones de longitud de onda que poseen ciertas características convenientes para la designación del color y que corresponden a las radiaciones monocromáticas de longitud de onda de 700,0 nm (rojo), 546,1 nm (verde) y 435,8 nm (azul). Por lo tanto, son una abstracción matemática, definidos en términos de curvas, en un sistema cartesiano que pone en abscisas las longitudes de onda de la luz en la región del visible del espectro y, en ordenadas, los colores primarios (valores triestímulos) en términos de la cantidad relativa que de cada uno se requiere para obtener una longitud de onda dada de luz. Los instrumentos que se utilizan para medir el color de un objeto son espectrofotómetros y colorímetros. Los primeros miden la luz reflejada por el objeto en el campo de las radiaciones visibles y la representación del color es la curva obtenida uniendo los valores medidos para cada longitud de onda. Los colorímetros miden la emisión de luz usando receptores tricromáticos (rojo, amarillo y verde); los resultados son una serie de números que corresponden a la luminosidad y a la cromaticidad.

Mediante este procedimiento se puede diferenciar los ladrillos en base a su color de una manera objetiva. Los colores de los ladrillos oscilan desde el blanco pajizo al negro violáceo, según la naturaleza de las arcillas, así como de la cantidad de impurezas presentes, del contenido en hierro y de la temperatura de cocción (VENIALE, 1991). Además, atmósferas del horno oxidantes proporcionan colores claros, mientras atmósferas reductoras originan colores oscuros (FABBRI et al., 1997). Los carbonatos facilitan el desarrollo de piezas de color claro. En efecto, el Fe presente en la tierra arcillosa queda “atrapado” en la estructura de silicatos cálcicos como la gehlenita, impidiendo la formación de hematites que es responsable del color rojo de los ladrillos (MANIATIS et al., 1981).

Deterioro

Las causas de degradación de los ladrillos se deben tanto a factores externos (cristalización de sales, humedad, heladicidad, atmósfera contaminada) como a propiedades inherentes a la materia prima y al proceso de fabricación. Únicamente para la determinación de la cantidad de sales solubles presentes en los ladrillos existe una norma específica, la UNE-EN 772-5/02. Pueden producirse defectos durante la preparación y moldeo, como deformaciones en la extrusión o laminaciones cuando se usan arcillas demasiado plásticas. Otros defectos pueden originarse durante el proceso de secado ya que, cuando se efectúa con demasiada rapidez, causa la formación de grietas y fisuras. Por último, tras la cocción puede producirse una disminución de la resistencia mecánica al no estar correctamente cocido el material (FRASER, 1986). Otros fenómenos que pueden originarse una vez que los ladrillos han sido cocidos son:

- La “rotura por caliche”, si están presentes granos de carbonatos en cantidades importantes o bien de tamaño igual o superior a 1 mm (CULTRONE, 2001). Su control se lleva a cabo de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE 67-039/93.
- La expansión por humedad, que es el aumento en dimensiones de los ladrillos debido a la captación de la humedad ambiental (CERDEÑO DEL CASTILLO et al., 1999). El control de la magnitud de la expansión se efectúa siguiendo la norma UNE 67036/99.

Para determinar la durabilidad de los ladrillos una vez puestos en obra, existe una serie de ensayos de enve-

jecimiento acelerado que permiten predecir el comportamiento de estos materiales durante un periodo de tiempo relativamente largo sin sufrir daños (ESBERT et al., 1997). No para todos los ensayos de envejecimiento existe una norma a seguir. Se pueden reseñar las que estudian el deterioro por la alternancia del hielo y deshielo (UNE 67028 EX/97) y por eflorescencia salina (UNE 67029 EX/95) que son específicas para ladrillos.

Los ensayos de envejecimiento acelerado suelen mostrar que los ladrillos cocidos a temperaturas elevadas son más duraderos debido al mayor grado de vitrificación alcanzado (CULTRONE et al., 2002).

Se han desarrollado aún pocos trabajos sobre el uso de consolidantes o hidrofugantes en productos de arcilla cocida (CULTRONE et al., 2003). Además, es importante tener en cuenta la gran variabilidad de composición y microestructura de los ladrillos, incluso los procedentes de la misma fábrica, ya que métodos de tratamiento válidos para ladrillos de baja porosidad no son eficaces para ladrillos con una porosidad más alta. En general, el éster de sílice favorece una buena cohesión entre las partículas del ladrillo debido a la polimerización del gel de sílice.

Notas sobre autoría de los textos

¹ Este capítulo ha sido elaborado por Giuseppe Cultrone, del departamento de Mineralogía y Petrología (Universidad de Granada).

Bibliografía

Referencia

CERDEÑO DEL CASTILLO J.; DÍAZ RUBIO R.; OBIS SÁNCHEZ J.; PÉREZ LORENZO A.; VELASCO VÉLEZ J. (1999) *Manual de patologías de las piezas cerámicas para la construcción*. Toledo: Ed. ATTEMIN

CULTRONE, G. (2001) *Estudio mineralógico-petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del Patrimonio Histórico*. Granada: Universidad (tesis doctoral)

CULTRONE, G.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA, O.; DE LA TORRE, M. J. (2001a) Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy*, 13, pp. 621-634

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA, O.; NECHAR, M.; ROMERO, R.; BAGUR, M.G. (2001b) Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. *Ceramics International*, v. 27, pp. 401-406

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA, O.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; DE LA TORRE, M. J. (2002) Decay behaviour of bricks and its evaluation using colorimetry. En GALÁN, E.; ZEZZA, F. (eds.) *Protection and conservation of the cultural heritage of the mediterranean cities*. Lisse: Swets & Zeitlinger BV, pp. 145-152

CULTRONE, G.; DE LA TORRE, M.J.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA, O. (2003) Evaluación de la durabilidad de ladrillos mediante técnicas destructivas (TD) y no-destructivas (TND). *Materiales de Construcción*, 53, pp. 41-59

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; ELERT, K.; DE LA TORRE, M.J.; CAZALLA, O.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C. (2004) Influence of mineralogy and firing temperature on porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, pp. 547-564

CHAROLA A. E.; LAZZARINI, L. (1986) Deterioration of brick masonry caused by acid rain. En BABOIAN, R. (ed.) *Materials degradation caused by acid rain* Washington DC: American Chemical Society, pp. 250-258

DELBROUCK, O.; JANSSEN, J.; OTTENBURGS, R.; VAN OYEN, P.; VIAENE, W. (1993) Evolution of porosity in extruded stoneware as a function of firing temperature. *Applied Clay Science*, 7, pp. 187-192

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; VENTURI, I. (1999) Microstructure and mechanical properties of clay bricks: comparison between fast firing and traditional firing. *British Ceramic Transactions*, v. 98, n° 1, pp. 12-18

ESBERT, R.M.; ORDAZ, J.; ALONSO, F.J.; MONTOTO, M.; GONZÁLEZ LIMÓN, T.; ÁLVAREZ DE BUERGO BALLESTER, M. (1997)

Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Barcelona: Collegi d'Apparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona

FABBRI, B. (1988) I metodi della mineralogia nella ricerca sui materiali ceramici, con particolare riferimento a quelli avanzati. *Mineralogica et Petrographica Acta*, v. 31, pp. 179-188

FABBRI, B.; GUALTIERI, S.; SANTORO BIANCHI, S. (1997) L'alternativa chamotte/calcite nella ceramica grezza: prove tecniche. En *Il contributo delle analisi archeometriche allo studio delle ceramiche grezze e comuni. Il rapporto forma/funzione/impasto*, Atti della 1ª Giornata di Archeometria della Ceramica, Bologna, 28/II/1997, pp. 183-190

FRASER, H. (1986) *Ceramics faults and their remedies*. London: A & C Black

KRETZ, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68, pp. 277-279

MANIATIS, Y.; SIMOPOULOS, A.; KOSTIKAS, A. (1981) Moessbauer study of the effect of calcium content in iron oxide transformations in fired clays. *Journal of American Ceramic Society*, 64, pp. 263-269

PAVÍA SANTAMARÍA, S. (1994) *Material de construcción antiguo de Logroño y La Rioja Alta: petrografía, propiedades físicas, geología y alteración*. La Rioja: Universidad (tesis doctoral)

RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; CULTRONE, G.; SÁNCHEZ NAVAS, A.; SEBASTIÁN, E. (2003) TEM study of mullite growth after muscovite breakdown. *American Mineralogist*, 88, pp. 713-724

TITE, M.S.; MANIATIS, Y. (1975) Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. *Nature*, 257, pp. 122-123

VENIALE, F. (1991) Raw materials and manufacturing processes in ancient ceramic artefacts. En BURRAGATO, F.; GRUBESSI, O.; LAZZARINI, L. (eds.) *First European Workshop on Archaeological Ceramics*, Rome, 1994, pp. 55-72

WARREN, J. (1999) *Conservation of bricks*. Oxford: Butterworth Heinemann

Normativa

ASOCIACIÓN española de normalización (AENOR). Normas

UNE 67-027/84. Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua. Norma española IRANOR, Madrid, 2 pp.

UNE-67-030/85. Ladrillos de arcilla cocida. Medición de las dimensiones y comprobación de la forma. Norma española IRANOR, Madrid, 2 pp.

UNE 67-039-93. Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de inclusiones calcáreas. Norma española AENOR, Madrid, 2pp.

UNE 67029 EX/95. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia. Norma española experimental AENOR, Madrid, 5 pp.

UNE 67019 EX/96. Ladrillos cerámicos de

arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones. Norma española experimental AENOR, Madrid, 9 pp.

UNE 67028 EX/97. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad. Norma española experimental AENOR, Madrid, 3 pp.

UNE 67036/99. Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad. Norma española AENOR, Madrid, 4pp.

UNE-EN 771-1/03. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: piezas de arcilla cocida. Norma española AENOR, Madrid, 44 pp.

UNE-EN 772-3/99. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería. Norma española AENOR, Madrid, 8 pp.

UNE-EN 772-4/99. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 4: determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad total y abierta de piezas de piedra natural para fábrica de albañilería. Norma española AENOR, Madrid, 10 pp.

UNE-EN 772-5/05. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 5: determinación del contenido en sales solubles activas en las piezas de arcilla cocida para albañilería. Norma española AENOR, Madrid, 12 pp.

UNE-EN 772-7/99. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 7: determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera al agua por capilaridad. Norma española AENOR, Madrid, 7 pp.

UNE-EN 772-11/01. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería. Norma española AENOR, Madrid, 9 pp.

UNE-EN 772-13/01. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 13: determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural). Norma española AENOR, Madrid, 9 pp.

UNE-EN 1052-1/99. Método de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: determinación de la resistencia a compresión. Norma española AENOR, Madrid, 14 pp.

UNE-EN 1052-2/00. Método de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: determinación de la resistencia a flexión. Norma española AENOR, Madrid, 13 pp.

CNR-ICR, NORMAL

7/81/. Assorbimento dell'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione

11/85. Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare

29/88. Misura dell'indice di asciugamento (drying index). CNR-ICR, Roma

PLIEGO RL-88 (1988) *Pliego general de condiciones para la recepción de ladrillos cerámicos en las obras de construcción*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente