

Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán (Colombia)

Characterising a historical bridge's bricks in Popayán (Colombia)

Jorge Alberto Galindo Díaz¹, Andrés Mauricio Muñoz² y Marisol Caicedo Muñoz³

RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar los procedimientos y resultados del estudio y caracterización físico-mecánica y químico-mineralógica de los ladrillos empleados originalmente en un puente de arco de albañilería cuya construcción data de la primera mitad del siglo XVIII, ubicado en la ciudad de Popayán, Colombia. Para ello se extrajeron núcleos de las zonas bajas del puente a partir de los cuales se obtuvieron especímenes que fueron sometidos a diferentes pruebas de laboratorio. La caracterización físico-mecánica cuantificó valores relativos a peso seco, peso suspendido, peso saturado, porosidad, gravedad aparente, densidad aparente, y por último, valores de carga máxima, resistencia a la compresión en frío y módulo de elasticidad. Los resultados obtenidos hacen ver la alta porosidad de los ladrillos y su baja capacidad resistente a esfuerzos de compresión. La caracterización químico-mineralógica se llevó a cabo mediante una combinación de pruebas que incluyeron difracción de rayos X (XRD), espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Varios minerales encontrados permiten deducir la fuente del material crudo, así como verificar algunas características de la producción de ladrillo de la época en esta región. Tridimita, cristobalita, magnetita y carbonato de calcio son algunas de las fases formadas por las temperaturas alcanzadas en la cocción, mientras que la presencia de sulfato de potasio en una de las muestras da razón de características de producción de material para la construcción. La combinación de los análisis XRD y XPS suministra información sobre la temperatura de quemado y las nuevas fases mineralógicas que aparecen al final de este proceso, mientras que FTIR permite comprobar la presencia de grupos funcionales OH y Si-O-Si, principalmente. Las características de estos ladrillos proporcionan datos valiosos para el propósito de restauración, formulando un nuevo ladrillo a partir del material crudo que se ajuste a los requerimientos de la construcción existente.

Palabras clave: ladrillos, características físico-químicas, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

This article presents the procedures and results of studying the physical-mechanical and chemical-mineralogical characterisation of the bricks originally used in a masonry arch bridge; the bridge was built in the first half of the 18th century in the city of Popayán, Colombia. Core-samples were thus extracted from the bridge's lower area and subjected to different laboratory tests. Physical-mechanical characterisation quantified values related to dry weight, suspended weight, saturated weight, porosity, apparent gravity, apparent density and maximum load values, cold compression resistance and elasticity modulus. The results revealed the bricks' high porosity and their low resistance to compression stress. Chemical-mineralogical characterisation involved a combination of tests including X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transformed infra-red spectroscopy (FTIR). Several minerals found led to deducting the source of the raw material, as well as verifying some brick production characteristics of the time in the said region. Tridimite, cristobalite, magnetite and calcium carbonate were some of the phases formed by the temperatures reached while firing the bricks, while potassium sulphate presence in one of the samples conveyed the nature of the construction materials' production characteristics. Combining XRD and XPS analysis provided information about firing temperature and the new mineralogical phases appearing at the end of this process; FTIR proved functional OH and Si-O-Si group presence. These bricks' characteristics provided valuable data for restoration purposes, formulating a new brick from raw material complying with reconstruction requirements.

Keywords: brick, physical-chemical characteristic, mechanical property.

Recibido: febrero 19 de 2008

Aceptado: junio 19 de 2008

¹ Arquitecto, Universidad del Valle, Colombia. Doctor, Arquitecto, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, España. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. jagalindod@unal.edu.co, jgalindo@telesat.com.co

² Ingeniero físico, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Estudiante de Ingeniería de Materiales y procesos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. andresmm63@gmail.com

³ Arquitecta Constructora, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Joven Investigadora" del Grupo de Trabajo Académico en Hábitat y Tecnología, Colciencias 2007, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. sol8173@yahoo.com

Introducción

En Colombia la mampostería de ladrillo constituye una parte muy significativa de las técnicas de construcción presentes en edificaciones históricas. Sin embargo, ante las fuertes variaciones medioambientales, el incremento de la polución y la presencia de diferentes organismos vivos, en los últimos años parece haberse acelerado el nivel de deterioro entre los ladrillos que las conforman, lo que hace necesario la sustitución de algunas de las piezas con el fin de mantener la integridad del edificio. Frente a esta situación, cobra importancia la tarea de determinar las propiedades físicas y la estructura mineralógica de los ladrillos pertenecientes a los edificios que hacen parte del patrimonio construido.

La investigación que soporta este artículo está enfocada a encontrar y afinar las rutinas apropiadas para la caracterización de piezas cerámicas de tal manera que ellas puedan ser aplicadas en el futuro a procesos de restauración de edificios históricos a partir del estudio de caso que tiene por objeto el puente de arco de mampostería construido en Popayán (Colombia) en la segunda mitad del siglo XVIII.

La primera parte del artículo describe brevemente las características geométricas de la estructura con el fin de destacar sus dimensiones y con ello su carácter paradigmático en la arquitectura y la ingeniería de Colombia. La segunda parte explica los procedimientos llevados a cabo con el fin de conocer tanto las características físico-mecánicas de los ladrillos que constituyen el puente como su composición química a partir de una serie de pruebas de laboratorio aplicadas en muestras tomadas directamente del puente y establecer así patrones de referencia acerca de su comportamiento resistente, su estructura mineralógica y la temperatura de cocción de los ladrillos empleados originalmente en la construcción.

Las conclusiones finales recogen los resultados obtenidos ofreciendo un perfil bien determinado de los ladrillos originales.

El puente objeto de estudio

El puente de arco de ladrillo, sobre el río Cauca, en la ciudad de Popayán, fue construido entre 1769 y 1773 por maestros de obras locales (Galindo y Paredes, 2008). Tiene 153 m de longitud y 5,84 m de ancho. Cuenta con un arco principal de medio punto de 19,06 m de diámetro que salva el río de caudal variable, y tres arcos de nivelación (8,47 m - 9,00 m - 10,35 m de luz, respectivamente), todos de medio punto y que dan la pendiente a la calzada vehicular por el lado norte (Figura 1). La estructura fue construida enteramente en ladrillos macizos de arcilla de dimensiones estandarizadas (40 x 20 x 10 cm) unidos con mortero de cal, aunque en la parte baja del arco principal se aprecian hiladas de piedra labrada.

Inspecciones visuales realizadas en 2006 y 2007 permitieron verificar que el puente no ha sido alterado por intervenciones estructurales recientes, con excepción de la restitución de la superficie de rodamiento en asfalto. Un revoque de la mampostería hecho con mortero de cemento tipo Portland en la primera mitad del siglo XX se encuentra en mal estado y sólo se mantiene en la parte superior de los tímpanos del puente (muros laterales). En el intradós de las bóvedas se evidencia un acelerado proceso de degradación de los ladrillos por meteorización del material arcilloso a causa de la percolación del agua lluvia, la exposición prolongada a la humedad ambiental y a la presencia de vegetación propia de las regiones tropicales que contribuye a la concentración de distintos organismos vivos sobre las superficies del puente (Figura 2).

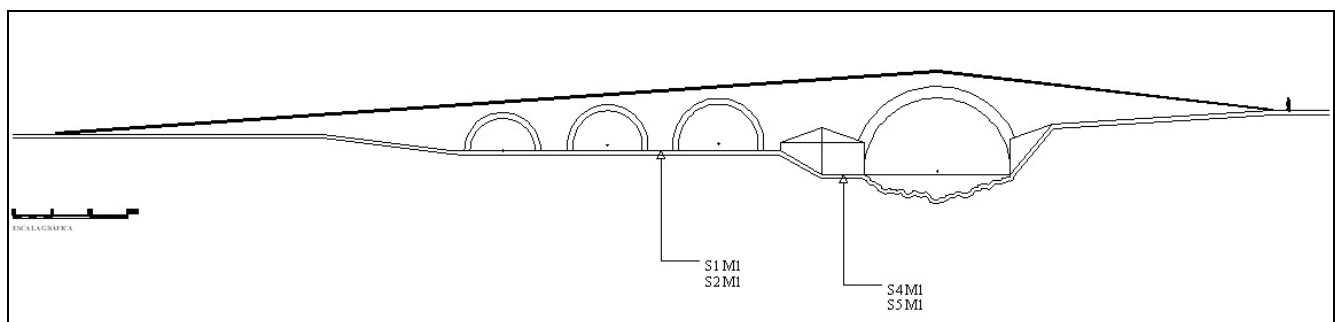


Figura 1. Alzada del puente sobre el río Cauca, en Popayán, sobre la que se señalan los puntos de extracción de muestras. Dibujo: Muñoz (2007)

Caracterización de los ladrillos

Una vez se logró contar con la información histórica y el levantamiento arquitectónico del puente objeto de estudio, se procedió a la toma de muestras de sus materiales constitutivos (ladrillo y mortero) ubicados en la zona de los arcos y los tímpanos mediante la extracción de núcleos de 0,4 m de longitud y 0,051 m de diámetro, haciendo uso de un taladro extractor tipo Hilti modelo DDBCQ-S. Los puntos de donde se obtuvieron las muestras se señalan en la Figura 1. A partir

de ellas se cortaron los especímenes empleados en las rutinas de caracterización de propiedades mecánicas y estructura físico-química de las piezas de arcilla, que se describen a continuación.

Propiedades físico-mecánicas

Una primera rutina experimental tuvo por finalidad determinar las siguientes propiedades de los especímenes obtenidos: peso seco (D), peso suspendido (S) y peso saturado (W). El tamaño de los especímenes y los procedimientos siguieron

las recomendaciones establecidas en la norma ASTM C20-00 (American Society for Testing and Materials, 2005): (a) cilindros cortados de los núcleos extraídos con medidas aproximadas a los 51 mm en diámetro y altura, y (b) cubos cortados de los núcleos con medida aproximada de 51 mm en cada arista. Los resultados obtenidos aparecen consignados en la Tabla 1.



Figura 2. Vista inferior de la rosca de uno de los arcos del puente sobre el río Cauca, en Popayán, en la que se aprecia el grado diferencial de deterioro de los ladrillos constitutivos. Foto: J. C. Muñoz (2007)

Tabla 1. Primera serie de datos obtenidos en la caracterización física de las muestras de ladrillo

Puente	Muestra	Peso Seco (D)(g)	Peso Suspendido (S)(g)	Peso Saturado (W)(g)
Sobre el río Cauca en Popayán	S1M1	120.6	75.3	150.7
	S2M2	115	69.4	145.9
	S4M1-1	219.4	133.4	277.2
	S4M1-2	235.2	143.4	293.7
	S5M1-1	189.4	115.1	238.0
	S5M1-2	193.4	117.7	242.6
	S5M1-3	196	119.2	246.5

Los valores correspondientes a volumen exterior (V), volumen de poros abiertos y cerrados, porosidad aparente (P), absorción de agua (A) y gravedad específica aparente (T) y densidad aparente (B), fueron obtenidos analíticamente a partir de los datos arrojados experimentalmente conforme a la norma ASTM C20-00 (American Society for Testing and Materials, 2005). Estos resultados aparecen consignados en la Tabla 2.

Tabla 2. Segunda serie de datos obtenidos en la caracterización física de las muestras de ladrillo

Puente	Muestra	Volumen exterior (V)(cm ³)	Volumen poros abiertos (cm ³)	Volumen poros cerrados (cm ³)	Porosidad aparente (P)	Absorción de agua (A)	Gravedad específica aparente (T)	Densidad aparente (B)
Sobre el río Cauca en Popayán	S1M1	75.4	30.1	45.3	39.9	25.0	2.66	1.60
	S2M2	76.5	30.9	45.6	40.4	26.9	2.52	1.50
	S4M1-1	143.8	57.8	86.0	40.2	26.3	2.55	1.53
	S4M1-2	150.3	58.5	91.8	39.9	24.9	2.56	1.56
	S5M1-1	122.9	48.6	74.3	39.5	25.7	2.55	1.54
	S5M1-2	124.9	49.2	75.7	39.4	25.4	2.55	1.55
	S5M1-3	127.3	50.5	76.8	39.7	25.8	2.55	1.54

A cada una de las muestras obtenidas se aplicó un conjunto de pruebas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C133-97 (American Society for Testing and Materials, 2004). A través de ellas se logró la obtención de los siguientes datos significativos: (a) resistencia a la compresión en frío, y (b) módulo de elasticidad. La prueba de resistencia a la compresión en frío se hizo mediante el uso de una prensa multiusos sistematizada PS-27-1. La lectura que mostró el equipo utilizado determinó los valores contenidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la prueba de compresión en frío

Puente	Muestra	Carga Máxima (kN)	Resistencia a la Compresión en Frío (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)
Sobre el río Cauca en Popayán	S1M1	7.96	5.07	208.30
	S2M2	7.89	4.94	96.58
	S4M1-1	29.58	9.19	232.88
	S4M1-2	19.57	6.04	144.66
	S5M1-1	6.92	2.78	87.48
	S5M1-2	21.29	7.53	171.85
	S5M1-3	10.88	4.14	89.67

Los resultados de la caracterización física señalan que los ladrillos del puente presentan una alta porosidad (39,4–40,4 %), lo cual no siempre puede ser una característica propia de la muestra original sino que puede estar relacionada con el natural desgaste físico y las condiciones medioambientales.

A pesar de la heterogeneidad propia de las unidades de arcilla comunes a los edificios históricos, en el puente del Cauca no existe una gran dispersión de los valores correspondientes a gravedad específica aparente (T) y densidad aparente (B), lo cual puede asociarse con las tradiciones constructivas locales de corte artesanal que seguían pautas de acción más o menos fijas. Sin embargo, los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión evidencian rangos muy bajos (2,78–9,19 MPa) en relación con lo establecido por la norma ASTM C62-00 (American Society for Testing and Materials, 2000), según la cual, en severas condiciones ambientales el ladrillo macizo debe presentar una resistencia a la compresión de al menos 21,1 MPa.

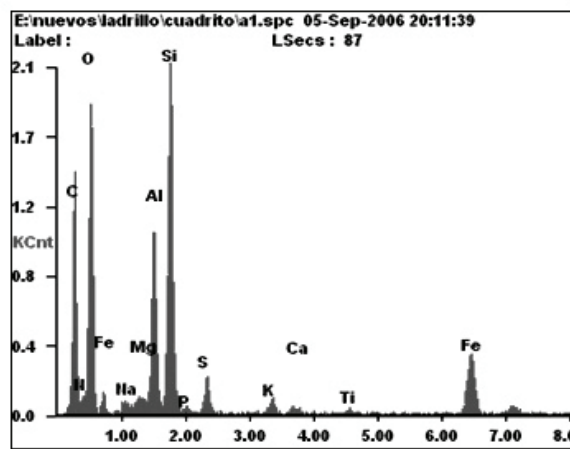
Pese a su baja capacidad resistente, el deterioro de los ladrillos no se produce a causa de los esfuerzos de compresión. Las inspecciones visuales llevadas a cabo permitieron deducir

que las áreas más afectadas se encuentran en las fronteras de la estructura y probablemente a causa de la incompatibilidad de las juntas de mortero con los ladrillos, a lo que se suma el efecto de la percolación del agua al cabo de muchos años.

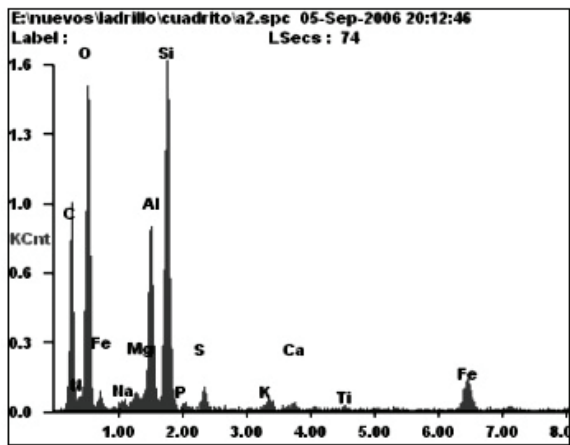
Caracterización químico-mineralógica

El proceso de caracterización químico-mineralógica se efectuó en el Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, mediante la aplicación de un conjunto de pruebas cuyos resultados, en conjunto, permiten obtener una precisa descripción de la estructura química de los ladrillos que constituyen el puente de Popayán.

Inicialmente, técnicas de análisis SEM fueron empleadas sobre dos tipos de muestras tomadas de la base del arco principal del puente: la primera en estado natural cubierta superficialmente por una capa orgánica, y la segunda en forma de pastilla extraída del interior de la muestra original. Las Figuras 3a y 3b, relacionadas a su vez con la tabla 4, fueron obtenidas del análisis de la muestra en estado natural.



a.



b.

Figura 3. a). Análisis SEM/EDX de la superficie de la muestra. b). Análisis SEM/EDX de la superficie de la muestra a varios micrómetros de distancia del anterior

Los resultados dejan ver al carbono como el elemento más significativo de la muestra (41,93% y 40,01% del peso total de la muestra y 50,92% y 48,67 % del porcentaje atómico) debido a la presencia de componentes orgánicos en su superficie. Le siguen en nivel de presencia, el oxígeno y el silicio, característica propia de los materiales arcillosos, aunque el primero de ellos se encuentra en mayor proporción de-

bido a la presencia de óxidos de hierro. El hierro compone la magnetita y el aluminio, así como elementos que se encuentran en menor proporción (Mg, Ca, Na entre otros), conforman algunos minerales que también integran la muestra.

Tabla 4. Cuantificación del análisis SEM/EDX de la superficie de la muestra

Elemento	Figura 3a		Figura 3b	
	Wt %*	At%**	Wt %*	At%**
CK	41,93	50,92	40,01	48,67
NK	09,35	09,73	08,43	08,80
OK	37,08	33,81	40,54	37,03
NaK	00,46	00,29	00,36	00,23
MgK	00,40	00,24	00,44	00,26
AlK	02,91	01,57	03,11	01,69
SiK	04,85	02,52	05,25	02,73
PK	00,10	00,05	00,12	00,06
SK	00,44	00,20	00,26	00,12
KK	00,17	00,06	00,15	00,06
CaK	00,08	00,03	00,11	00,04
TiK	00,08	00,03	00,07	00,02
FeK	02,14	00,56	01,15	00,30

(*) Porcentaje con relación al peso total de la muestra.

(**) Porcentaje con relación al peso atómico de la muestra.

Las Figuras 4a y 4b, relacionadas directamente con la Tabla 5, muestran las intensidades representativas de los elementos que componen la muestra en forma de pastilla extraída del interior de la muestra original.

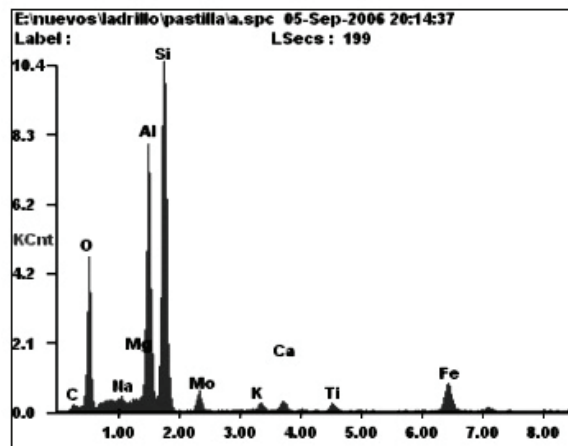
Tabla 5. Cuantificación del análisis SEM/EDX de la superficie de la muestra

Elemento	Figura 4a		Figura 4b	
	Wt %	At%	Wt %*	At%**
CK	11,09	18,25	11,10	18,27
OK	40,31	49,81	40,63	50,17
NaK	01,87	01,61	01,82	01,57
MgK	01,03	00,84	01,04	00,84
AlK	13,74	10,07	13,68	10,01
SiK	23,94	16,85	23,42	16,47
MoL	02,98	00,61	03,11	00,64
KK	00,45	00,23	00,50	00,25
CaK	00,57	00,28	00,56	00,28
TiK	00,55	00,23	00,53	00,22
FeK	03,47	01,23	03,61	01,28

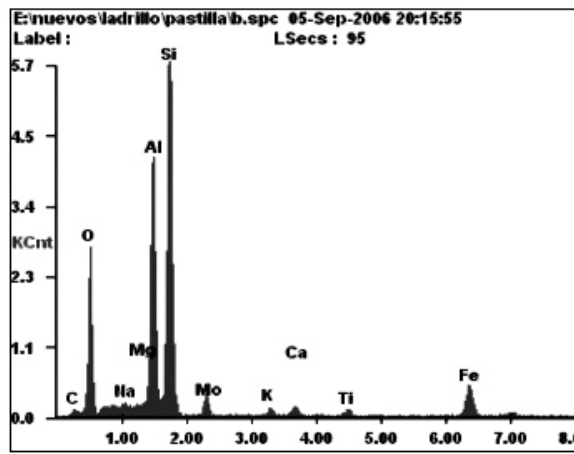
Es apreciable ahora la disminución del porcentaje de carbono con respecto a la muestra natural (de 41,93% y 40,01% a 11,09% y 11,10%) dado que en ella ha desaparecido la parte orgánica en la superficie. De forma contraria, el contenido de silicio se incrementa de 4,85% y 5,25% a 23,34% y 23,42% en el peso total de la muestra, al igual que el del oxígeno, que aumenta acercándose muy levemente al contenido elemental del material utilizado en la fabricación de cerámicas.

También mediante el análisis SEM/EDX fue posible obtener imágenes de alta calidad donde se ponía en evidencia la presencia detallada de agentes biológicos depositados sobre las superficies de los ladrillos. La micrografía con magnificación de 326x (figura 5) deja ver algunas hifas y la formación de micelio del hongo que ha crecido en la superficie de la

muestra de ladrillo por su exposición al ambiente durante un largo periodo de tiempo. La alta porosidad de los ladrillos facilita la presencia de estos organismos.



a.



b.

Figura 4. a). Análisis SEM/EDX del interior de la muestra. b). Análisis SEM/EDX de la superficie de la muestra a varios micrómetros de distancia del anterior

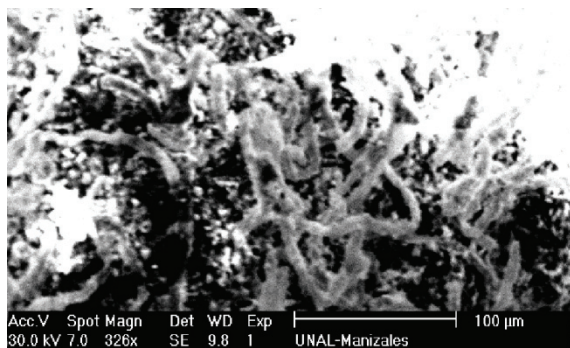


Figura 5. Micrografía SEM/EDX (326x) de la parte orgánica en la superficie de la muestra M2. Fuente: Laboratorio de Física del Plasma, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Por su parte, la composición mineralógica de varias de las muestras fue determinada mediante pruebas de difracción de rayos X, usando un difractómetro Bruker AXS D8 con el fin de predecir no solo el origen de la materia prima sino también las condiciones a las que ha sido sometida en la producción de material para la construcción y en su exposición

a las condiciones atmosféricas (Moropoulou *et al.*, 2002). Los resultados de esta prueba se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6. Cuantificación de las fases cristalinas presentes en las muestras a través de la técnica XRD

Compuesto	% de compuestos en Ref. 7151	% de compuestos en Ref. 7152	% de compuestos en Ref. 7153
Quartz,low	17.59	24.98	4.28
Trydimite	-	-	27.46
Cristobalite,low	52.98	45.57	44.2
Hematite	-	3.89	-
Palgorskyte	6.64	9.6	4.07
Anorthite	0.47	6.7	15.08
Muscovite	22.30	-	-
Barrerite	-	-	4.91
Sulfato Potasio	-	9.26	-

Todas las muestras de ladrillo manifiestan la presencia de fases cristalinas en diferentes proporciones de cuarzo, cristobalita, palgorsquita y anortita. La presencia elevada de cuarzo en la muestra identificada con el número 7152, asociada al color oscuro de esta y la combinación de cristobalita puede atribuirse a la presencia de partículas de cuarzo de gran tamaño (Rice, 1987). La presencia de cristobalita, asociada al color naranja de los ladrillos, indica temperaturas de quemado de al menos 1.200°C (Moropoulou *et al.*, 2003).

La anortita es un feldespato cálcico formado por la interacción de los residuos de la descomposición de la calcita (CaCO_3) y los minerales arcillosos en el proceso de cocción de la materia prima al lograr esta una temperatura aproximada a los 900 °C, razón por la que puede pensarse en una temperatura no superior a 1.000°C en la quema de la muestra analizada (Cardiano *et al.*, 2004). La presencia de la hematita, que aparece bajo temperaturas cercanas a los 850°C, es el indicador más valioso de su temperatura de quemado.

La presencia de grupos funcionales de algunos de los compuestos mineralógicos presentes en las muestras de ladrillo se establecieron a partir de medidas de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier obtenidas con el espectrómetro Spectrum BX FT-IR System Perkin Elmer BX2.

La Figura 6 contiene el espectro comparado de las tres muestras analizadas. A partir de ella es posible afirmar que las bandas entre 3.200 cm^{-1} - 3.600 cm^{-1} con máximo en 3.424,09 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones del grupo funcional OH del H_2O introducida en algunos minerales durante su formación y exposición al ambiente (Sheila *et al.*, 2006). La banda entre 1.100 cm^{-1} y 1.000 cm^{-1} con máximo en 1.091,99 cm^{-1} se atribuye al enlace Si-O-Si presente en la estructura de los filosilicatos en la muestra; además este pico es característico del mineral arcilloso anortita. Entre 780 cm^{-1} y 800 cm^{-1} se registra una banda con su máximo en 794,73 cm^{-1} que representa la contribución del cuarzo a la muestra.

Se establecieron también medidas de XPS para análisis químico superficial cualitativo de cada una de las muestras haciendo uso de un sistema Thermo VG Escalab 250. Las

muestras se sometieron a alto vacío por un espacio de tiempo de 0,5 horas, previo a la obtención de los espectros. Se han logrado espectros amplios sobre todo el rango espectral del instrumento (0 a 1200 eV). Después de un ataque iónico de 100 sg con el fin de hacer una limpieza superficial a las muestras se obtuvo cada uno de los espectros. El ataque se realizó con una corriente iónica de 3 uA y 3Kv de potencia. Los resultados se recogen en la Tabla 7.

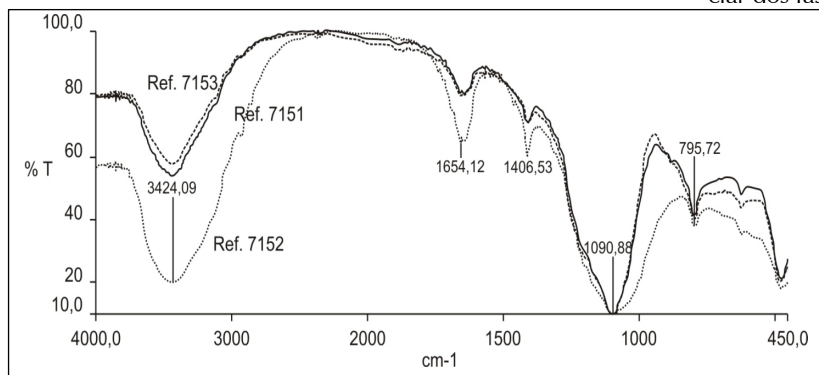


Figura 6. Espectro FT-IR de las muestras de ladrillo del puente Popayán. Porcentaje de transmitancia en unidades arbitrarias en función del número de onda característico de los modos de oscilación que registran las diferentes moléculas presentes la muestra en interacción con el infrarrojo. Fuente: Laboratorio de Física del Plasma, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Tabla 7. Cuantificación de los componentes presentes en las muestras a través de la técnica de espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS)

Compuesto	% de compuestos en Ref. 7151	% de compuestos en Ref. 7152	% de compuestos en Ref. 7153
SiO ₂	19,18	26,37	31,18
Fe ₃ O ₄	4,61	6,35	5,83
Al ₂ O ₃	-	8,46	-
CaCO ₃	-	10,41	-
Anortita	-	-	8,51
Caolita	11,79	-	6,04
Cão	5,07	-	-
CaCl ₂	-	2,51	-
Al(OH)	-	10,68	-
Al Metálico	-	3,24	-
CH	-	-	0,43
C-C	14,5	4,82	4,04
C=O	17,91	-	9,45
C-O	14,5	12,4	29,59
Grafito	-	6,83	-

Dos fases de hierro férrico (Fe⁺⁺⁺) quedan en evidencia por los análisis XPS y XRD de la Ref. 7152. La fase cristalina de la hematina (Fe₂O₃) se muestra a través del análisis XRD, mientras, la magnetita (Fe₃O₄) la manifiesta el análisis XPS en un 6,35%, lo que lleva a pensar que esta muestra fue cocida a una temperatura mayor a los 1.050°C, la cual está registrada como la temperatura de cambio de fase de hematita a magnetita, hecho además comprobado por la presencia de cristobalita en esta misma muestra. Es la misma presencia de magnetita la que le confiere el color marrón que caracteriza

a este tipo de muestra, corroborando el análisis previo por inspección visual.

El análisis XPS muestra un 26,37% de SiO₂, siendo la representación del total de la sílice que se encuentra haciendo parte de la Ref. 7152. De otro lado, el análisis XRD permite evidenciar un 75,55% de este mismo compuesto integrando la muestra analizada; la diferencia es que este permite apreciar dos fases cristalinas en diferentes proporciones (el cuarzo bajo en un 24,98% y la cristobalita bajo en un 45,57%).

El carbonato de calcio (CaCO₃ en un 10,41%) y el cloruro de calcio (CaCl₂ en un 2,51%) también son puestos en evidencia gracias al análisis XPS, así como diferentes compuestos carbonados como el grafito (en un 6,83%) y enlaces C-C (4,82%), que responden muy posiblemente a la presencia de lignito, materia orgánica que normalmente se encuentra asociada a las arcillas, formado tras la descomposición vegetal. El bajo grado de concentración de los carbonatos

se puede asociar a su baja capacidad mecánica: se sabe que ellos tienen una positiva influencia en la textura de los ladrillos quemados a bajas temperaturas favoreciendo un alto grado de vitrificación y alta resistencia a los esfuerzos de compresión (Eler et al., 2003).

Conclusiones

Conociendo las características composicionales de los materiales utilizados para la construcción de edificios históricos, el proceso mediante el cual se obtienen este tipo de materiales y las condiciones medioambientales a las que ha estado sometido el edificio, es posible pensar en métodos que permitan una valoración detallada, acciones de mantenimiento o rehabilitación e incluso la fabricación de piezas de restitución compatibles con las originales. Sin embargo, ello demanda un estudio de las condiciones particulares de cada caso.

En edificios históricos existentes en América Latina, el ladrillo es uno de los materiales más extensamente usados, por lo que se hace necesario adelantar estudios locales orientados a un mejor conocimiento de sus propiedades físico-mecánicas y físico-químicas, especialmente si se tiene en cuenta que está expuesto a duras condiciones medioambientales causando niveles de descomposición muy diferentes.

La combinación simultánea de técnicas de análisis sobre muestras extraídas directamente de la estructura original parece ser entonces el camino confiable para obtener una información más o menos precisa acerca de sus materiales constitutivos. La investigación histórica enriquece la percepción del contexto en el que se levanta el edificio patrimonial. Las pruebas físico-mecánicas permiten identificar, entre otras cosas, el grado de porosidad de las piezas y su capacidad de resistencia a la compresión, lo que a su vez se asocia con el grado de permeabilidad y su nivel de vitrificación.

Sin embargo, ambos datos por sí solos pueden ser insuficientes. Las pruebas SEM/EDX dan cuenta de las diferencias composicionales más importantes entre las capas exteriores e interiores de las muestras. El análisis XRD suministra valiosa información acerca de los componentes mineralógicos y las fases cristalinas presentes en las muestras, aunque sus resultados pueden llegar a ser sobrevalorados: hay que tener siempre presente que la composición de los ladrillos históricos se afecta a causa de los procesos de alteración de las materias primas. Finalmente, el análisis FT-IR permite el análisis cualitativo y cuantitativo relativo a la concentración de los componentes de los ladrillos.

A partir del conocimiento detallado del material es posible entonces proponer medidas de reparación, conservación y reemplazo. Sin embargo, encontrar un ladrillo de restitución que iguale las propiedades físicas y químicas de los ladrillos históricos puede ser una tarea compleja que requiere además de un proceso iterativo de tipo experimental a partir de los datos obtenidos por los medios aquí descritos.

Agradecimientos

Los autores quieren dejar constancia de sus agradecimientos al profesor de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, físico Alfonso Devia Cubillos †), por su respaldo al desarrollo de esta investigación..

Bibliografía

American Society for Testing and Materials., ASTM C20-00 Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water., West Conshohocken (PA), EU, 2005.

American Society for Testing and Materials., ASTM C133-97 Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories., West Conshohocken (PA), EU, 2004.

American Society for Testing and Materials., ASTM C62-00 Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale)., West Conshohocken (PA), EU, 2000.

Cardiano, P., Ioppolo, S., De Stefano, C., Pettignano, A., Sergi, S., Piraino, P., Study and characterization of the ancient bricks of Monastery of San Filippo di Fragalà in Frazzanò (Sicily)., *Analytica Chimica Acta*, Vol. 519, No. 1, 2004, pp. 103-111.

Elert, K., Cultrone, G., Rodríguez, C., Sebastián, E., Durability of bricks used in the conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure., *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 4, No. 2, 2003, pp. 91-99.

Galindo, J., Paredes, J.A., Puentes de arco de ladrillo en la región del alto Cauca. Una tradición constructiva olvidada., Unibiblos, Bogotá, 2008.

Moropoulou, A., Polikreti, K., Ruf, V. y Deodatis, G., San Francisco Monastery, Quito, Ecuador: characterization of building materials, damage assessment and conservation considerations., *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 4, No. 2, 2003, pp. 101-108.

Moropoulou, A., Cakmak, A. y Polikreti, K., Provenance and technology investigation of the Agia Sophia bricks, Istanbul, Turkey., *Journal American Ceramic Society*, Vol. 85, No. 2, 2002, pp. 366-372.

Rice, P.M., *Pottery Analysis: A Sourcebook.*, University of Chicago Press, Chicago, 1987.

Sheila, J.S., Darby, M., Marinkovic, N., Dunbar, N., An FTIR study of hydrogen in anorthoclase and associated melt inclusions., *American Mineralogist*, Vol. 91, No. 1, 2006, pp. 12-20..