

Estudio y caracterización de los ladrillos de un puente histórico en Buga (Valle del Cauca)

Study and characterization of bricks from a historical bridge in Buga (Valle del Cauca)

Jorge Galindo¹, Jairo Paredes¹, Andrés Muñoz²*

¹Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Carrera 27 N.º 64-60, Manizales, Caldas, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Calle 59A N.º 63-20, Medellín, Colombia

(Recibido el 5 de marzo de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

Resumen

En Colombia, la albañilería constituye una muy significativa técnica de construcción presente en edificaciones históricas. Sin embargo, ante los cambios de uso que por lo general implican un incremento de las cargas vivas, las fuertes variaciones medioambientales, el incremento de la polución y la presencia de diferentes organismos vivos –entre otros factores-, en los últimos años parece haberse acelerado el nivel de deterioro de los materiales que la conforman (ladrillo y mortero de cal), lo que hace necesario en muchas ocasiones determinar sus propiedades físico – mecánicas y su composición química y mineralógica con el fin de diagnosticar el real estado de la estructura. Este artículo trata de las rutinas apropiadas para tal caracterización de 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 la ciudad de Buga (Valle del Cauca) en la segunda mitad del siglo XIX, se dará cuenta de la manera en que los análisis mecánicos de los ladrillos permiten contar con unos patrones de referencia acerca de su comportamiento resistente; simultáneamente, la caracterización mineralógica permite identificar la composición y temperatura de cocción de los ladrillos empleados originalmente en la construcción.

----- *Palabras clave:* Puentes de arco de ladrillo, materiales históricos, piezas cerámicas

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 6 + 881 00 77, correo electrónico: jagalindod@unal.edu.co (J. Galindo)

Abstract

In Colombia, bricklaying is constituted as a very significant construction technique present in historical buildings. However, with changes in their use, which generally implied increased dynamic loads, strong environmental variations, increased pollution, and the presence of different living organisms – among other factors – in recent years have apparently accelerated the deterioration of the materials conforming them (brick and lime mortar), in many occasions making it necessary to determine their physical and mechanical properties along with their chemical and mineralogical composition to diagnose the real state of the structure. This article explores the appropriate routines for such characterization to permit their future application in restoration processes of historical buildings. From the case study involving the masonry brick arch bridge constructed in the city of Buga (Valle del Cauca) during the second half of the 19th century, we will establish how mechanical analysis of the bricks allows having reference patterns of its resistance behavior; simultaneously, mineralogical characterization permits identifying the composition and firing temperature of the bricks originally used in the construction.

----- **Keywords:** Bridges of brick arch, historical materials, ceramic pieces

Introducción

Este artículo describe la manera en que se analizaron ocho muestras de los ladrillos del puente de La Libertad situado en la ciudad de Buga (en el actual Departamento del Valle del Cauca), construido en el último cuarto del siglo XIX. Tales análisis pretenden obtener una caracterización básica de sus propiedades físico – mecánicas y mineralógicas para así poder contar con datos útiles que permitan tomar decisiones en futuras intervenciones estructurales, en el reemplazo de unidades de ladrillo y, en lo posible, contar con información susceptible de ser comparada con otros tipos de ladrillos históricos en Colombia y el Valle del Cauca, enriqueciendo el campo de la historia de la tecnología nacional y regional.

Historia de la construcción del puente

Los trabajos de construcción del puente llamado La Libertad se iniciaron en 1874 gracias a un contrato firmado entre el señor Antonio María Soto -presidente de la Junta constituida para tal fin- y el ingeniero colombiano Modesto Garcés.

Mediante este documento, el segundo se obligaba a construir un puente sobre el río Guadalajara, conforme a los diseños que poseía la Junta y según los cuales, este debía hacerse mediante tres arcos levantados sobre estribos de piedra labrada por el exterior, desde flor de tierra hasta el arranque de los arcos. Hay que señalar también que en el contrato se estipulaba que las bóvedas debían hacerse conforme a los *dictados de la ciencia*, soportando un peso estimado en 12,5 Tn. Desde sus comienzos, la estructura se consideraba como una entidad formada por tres partes claramente diferenciadas: (a) el tramo central del puente de 3 arcos sobre el río, cada uno con 10 m de luz que sumados al espesor de los pilares permitía alcanzar una longitud total de 41 m; (b) los terraplenes que tenían 25 m de largo cada uno; y (c) el viaducto formado también por arcos de medio punto, todos de mampostería de ladrillo, de 50 m de longitud. El plazo fijado para la terminación de los trabajos era de 4 años, período durante el cual el propio Garcés quedaba con el carácter de recaudador de las contribuciones impuestas en el Municipio para las obras del puente y canalización del río. Adicionalmente, el ingeniero recibía

en pago tanto la mano de obra de los presidarios, algunos materiales disponibles (ladrillos y maderas principalmente), el producto de la contribución sobre mortuorias, las donaciones voluntarias, las limosnas que la iglesia recogiera para tal fin y 4 mil pesos que la Legislatura del Estado Soberano del Cauca había aprobado en calidad de auxilio; todo ello hasta sumar los \$28.000 que costaría la obra. Existen evidencias documentales [1] que permiten afirmar que durante el proceso constructivo se reutilizaron las potentes cimbras sobre las que habrían de descansar más de los 38 mil ladrillos utilizados, fabricados en su mayoría en un galpón del que se disponía con exclusividad y los que se pegaban usando las cales traídas desde la cercana población de Víjes. Posteriormente, en fecha incierta, pero antes de ser puesto en servicio a comienzos del siglo XX, se construyeron los viaductos de nivelación: el del lado norte consta de 9 arcos de medio punto de luz variable, y el del lado sur de solo 3 arcos, también de luz variable, todos en ladrillo.

Estado de conservación de la estructura

Un levantamiento arquitectónico realizado en 2005 (Figura 1) verificó las dimensiones a las que hacían referencia los documentos históricos. Además, se observó que el ancho del puente era de 6 m constantes, aunque una intervención efectuada a mediados del siglo XX mediante vigas de hormigón en voladizo a cada lado, aumentó su ancho total a 8 m.

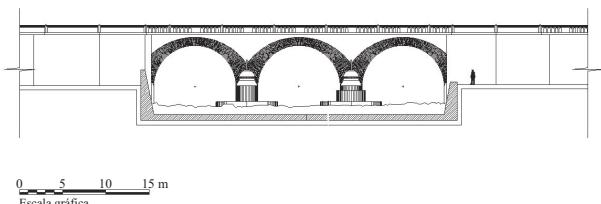


Figura 1 Levantamiento de los tres arcos centrales del puente La Libertad, sobre el río Guadalajara, en Buga

En el tramo central todos los arcos son de medio punto con un diámetro de 9,51 m, en tanto que la línea de sus impostas se encuentra siempre al mis-

mo nivel. Los ladrillos de las roscas acusan una disposición radial con trama idéntica y dimensiones iguales: 0,95 m en la clave y 1,82 m en los riñones. La altura libre entre el intradós de la clave y el nivel medio de las aguas es de 7,00 m. El ancho de las pilas centrales es de 2,53 m. En su tramo más alto, los tímpanos alcanzan una altura de 4,09 m y su espesor equivale a un muro en doble tizón, es decir, 80 cm. El puente se encontraba en buen estado de conservación aunque las bases de las pilas del tramo central presentaban un acusado deterioro a causa de la acción erosiva de las aguas del río Guadalajara lo que seguramente obligó (c.a. 1990) a un recalce en hormigón armado de tipo superficial. La inspección de 2005 determinó también que existen cavidades bajo las pilas por socavamiento de la acción hídrica.

Metodología

Los ladrillos son materiales cerámicos que se obtienen por un proceso de quemado de arcillas crudas a temperaturas que oscilan entre 650 y 1.000°C [2]. Su color, composición y propiedades mecánicas pueden depender de la naturaleza de la arcilla (caolinita, illita, y esmectita como las más generales encontradas en este tipo de materias primas) y cantidad de los acompañantes no plásticos (cuarzo, feldespatos y carbonatos), así como de las características de cocción, ambiente del horno (oxidante, reductor o semi-reductor), su operación y temperatura y en general, las acciones propias del proceso de quemado [3]. En condiciones apropiadas del proceso de cocción el mineral arcilloso puede sobrevivir, aunque materias primas con porcentajes considerables de calcita pueden estar sujetas a dos principales procesos termales: deshidroxilación de las arcillas (400-600°C) y descarbonatación de los materiales calcáreos (750-850°C) [4, 5]. Temperaturas más altas conducen a los productos de la descomposición de la calcita a reaccionar con las arcillas que forman nuevas fases de los silicatos de calcio tales como gehlenita, anorthita o diopsita [6, 7]. Por el contrario, al calentar arcillas pobres en compuestos calcáreos la mineralogía de la materia prima se conserva en el producto cocido [3]. La materia prima para la elaboración de ladrillos

se puede caracterizar mediante una combinación de técnicas: físicas, químicas, e incluso la simple inspección visual, cada una de las cuales aporta información que se complementa con las otras. A continuación se describe la metodología llevada a cabo durante el proceso de investigación.

Características externas de los ladrillos

En este puente, como en muchos otros construidos desde el siglo XVIII y hasta las primeras décadas del siglo XX en la región del valle geográfico del río Cauca [1], la mampostería es un material compuesto por ladrillos fabricados a pie de obra y organizados conforme a una determinada disposición geométrica. Están unidos entre sí por el mortero de pega, el cual -para este caso- fue elaborado gracias a una mezcla de cal y arena en proporción 1:3, conforme a lo pactado en el contrato original de 1875. De otra parte, el material de relleno dispuesto sobre las bóvedas del puente –dentro de los espacios vacíos o *senos*- está conformado por una mezcla de tierra negra, piedra de canto rodado y fragmentos residuales de ladrillo. En el puente de Buga los ladrillos son piezas de dimensiones más o menos fijas de 20 x 40 x 10 cm, lo que permite una adecuada trabazón geométrica y se distribuyen uniformemente en las bóvedas y los tímpanos. Su coloración es homogénea: poseen casi todas las piezas un tono anaranjado intenso que en años recientes ha sido recubierto superficialmente con

pinturas de color marrón e imitación de las juntas con líneas regulares de color blanco.

Caracterización físico – mecánica de las piezas cerámicas

Una vez se pudo contar con la información histórica y el levantamiento arquitectónico del puente, se procedió a la toma de muestras de ladrillos ubicados en la zona baja de los arcos y los tímpanos (allí donde las piezas eran sin duda originales), mediante la extracción de núcleos haciendo uso de un taladro extractor tipo HILTI modelo DDBCQ-S. Luego de fijar el taladro al plano interior de algunos de los sitios escogidos aleatoriamente, se realizó la extracción de 8 núcleos utilizando en ello una broca de 0,4 m de longitud y 0,051 m de diámetro interno (Figuras 2A y 2B). De cada una de las 8 muestras obtenidas *in situ* se cortaron igual número de especímenes con el fin de realizar en ellos una caracterización física encaminada a determinar su peso seco, suspendido y saturado, y así hacer los cálculos correspondientes a volumen exterior, volumen de poros abiertos y cerrados, porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente. Vale la pena aclarar que cuando se usan pruebas destructivas (como en este caso lo son los núcleos extraídos) en el estudio de estructuras históricas, es un hecho común contar con un bajo número de especímenes a fin de no crear problemas a la durabilidad de la edificación [3].

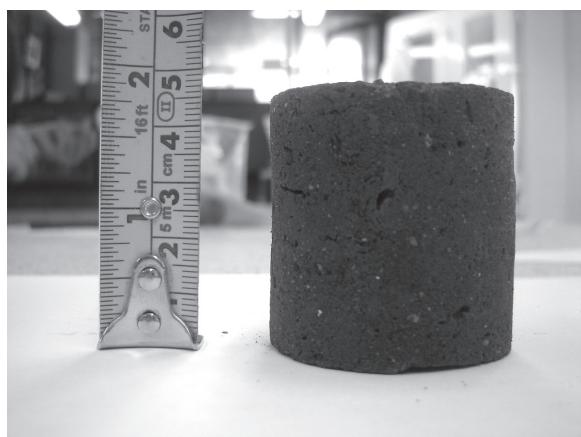


Figura 2 A) Proceso de extracción de núcleos de la mampostería de las bóvedas del puente, **B)** Especímenes cortados a partir de las muestras extraídas de la mampostería del puente

El tamaño de los especímenes y los procedimientos aplicados en ellos siguieron las recomendaciones establecidas en la norma NTC-674, equivalente a la norma ASTM C20:00 [8]. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Los valores correspondientes a volumen exterior (V),

volumen de poros abiertos y cerrados, porosidad aparente (P), absorción de agua (A), gravedad específica aparente (T) y densidad aparente (B), fueron obtenidos analíticamente a partir de los datos anteriormente tomados y aplicados en las fórmulas contenidas en la norma NTC 674 [8]. Los resultados de estas pruebas aparecen consignados en la tabla 1.

Tabla 1 Serie de datos obtenidos en la caracterización física de las muestras de ladrillos antiguos

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)
M1	83,7	41,7	42,0	49,8	36,0	2,76	1,38
M2	76,4	29,0	47,4	38,0	22,4	2,73	1,69
M3	81,5	36,3	45,2	44,5	28,0	2,87	1,59
M4	79,7	29,0	50,7	36,4	21,1	2,71	1,73
M5	74,9	29,3	45,6	39,1	23,0	2,80	1,70
M6	73,8	27,7	46,1	37,5	21,8	2,76	1,72
M7	74,2	24,5	49,7	33,0	18,6	2,65	1,78
M8	69,1	16,4	52,7	23,7	13,0	2,40	1,83

Con el fin de llevar a cabo la caracterización mecánica de los ladrillos se aplicó un conjunto de pruebas de laboratorio siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 682, equivalente a la norma ASTM C133/97 [9]. A través de ellas se logró la obtención de los siguientes datos significativos: (a) resistencia a la compresión y (b) módulo de elasticidad. La prueba de resistencia a la compresión en frío se realizó mediante el uso de una Prensa Multiusos Sistematizada PS-27-1, de funcionamiento electromecánico y sensibilidad de 50 kNf, en un ensayo inconfinado con pistón de carga de 2,8" de diámetro a una velocidad de 1,4224 mm/min. Una imagen del procedimiento se puede apreciar en la figura 3. Los valores correspondientes al módulo de elasticidad se obtuvieron analíticamente. La lectura que mostró el equipo utilizado determinó los valores contenidos en la tabla 2.

A fin de contar con valores de contraste, se tomó la decisión de realizar un conjunto idéntico de pruebas a varios especímenes obtenidos a partir

de ladrillos de fabricación reciente mediante técnicas artesanales y producidos en la misma zona geográfica. Para ello se obtuvieron muestras aleatorias en las ladrilleras de la vereda Chambimbal, en inmediaciones de Buga, en donde aun hoy pueden verse hornos de quema de ladrillo con más de 60 años de antigüedad. Las piezas nuevas, sin embargo, eran de dimensiones menores a las del puente histórico: 10 cm x 20 cm en su planta rectangular y 6 cm de altura, en promedio y por tal motivo no fue posible contar con especímenes cilíndricos idénticos al del primer conjunto de pruebas. Se emplearon esta vez muestras con forma de prismas regulares de 5 x 5 x 5 cm que fueron sometidas a compresión no confinada en una prensa sistematizada PS-27-1, de funcionamiento electromecánico y sensibilidad de 50 kNf, con pistón de carga de 2,8" de diámetro a una velocidad de 1,4224 mm/min. Los resultados obtenidos sobre 8 muestras seleccionadas aleatoriamente de un total de 24 disponibles, se recogen en la tabla 3.

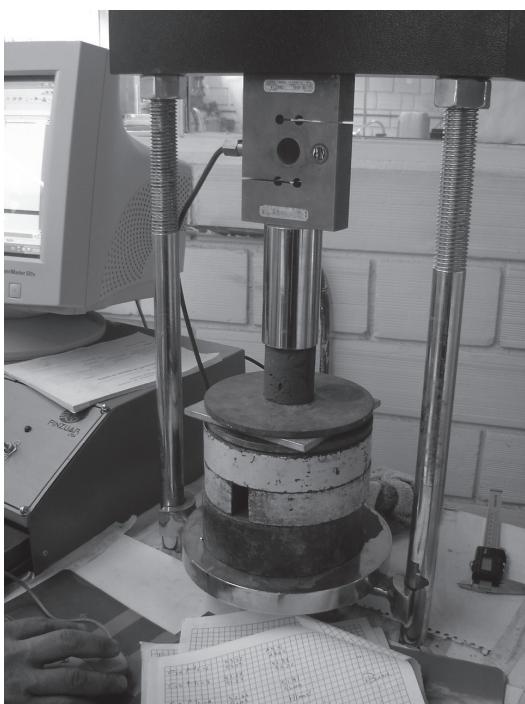


Figura 3 Prueba de compresión en frío a uno de los núcleos obtenidos en el puente La Libertad mediante Prensa Multiusos Sistematizada PS-27-1

Se percibe fácilmente que en ambos grupos (ladrillos antiguos y ladrillos nuevos) hay una dispersión elevada de valores de resistencia a la compresión en frío: rangos entre 5,24 MPa y 8,27 MPa con promedio de 7,35 MPa para el primero

y 0,47 MPa y 5,31 MPa con promedio de 1,89 MPa para el segundo. Teniendo en cuenta que las muestras son de geometrías distintas y por tanto de áreas distintas, la propiedad comparable es el *esfuerzo*, con lo cual los valores promedio para cada conjunto de muestras estudiado, no son próximos. No deja de ser también importante resaltar la notable diferencia en la magnitud de la resistencia a la compresión en frío, siendo mucho menor el valor correspondiente a los ladrillos nuevos con relación a los ladrillos viejos. Además, y en relación con el módulo de elasticidad, los ladrillos nuevos son más deformables y los ladrillos viejos son más frágiles.

Caracterización mineralógica de las piezas cerámicas

Para la caracterización mineralógica de las muestras se escogió aleatoriamente uno de los núcleos de ladrillo antiguo del cual se tomaron a su vez dos muestras referenciadas con los números 7145 y 7146; la primera en forma de pastilla de 1,57 cm de diámetro y 0,2 cm de alto; la segunda reducida manualmente a polvo de grano fino y homogéneo. El análisis químico superficial de la muestra 7145 se realizó por espectroscopía fotoeléctrica de rayos X (XPS). Los resultados de este análisis se visualizan en la figura 4 y se resumen en la Tabla 4.

Tabla 2 Resultados de la prueba de compresión en frío aplicada en muestras de ladrillos antiguos

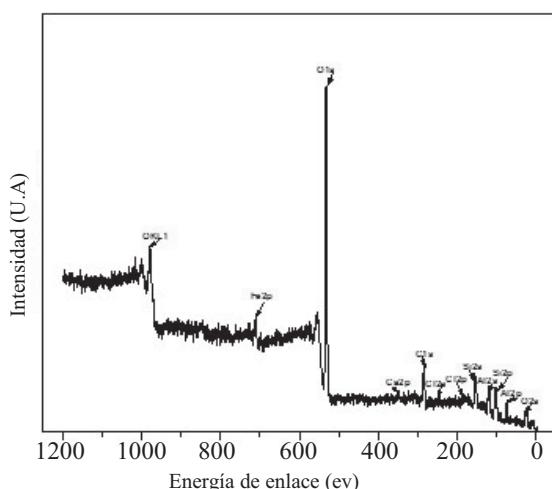
Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión en frío (Mpa) (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (Mpa) (kg/cm ²)
M1	13,01	8,27	339,53
M2	11,91	7,58	309,16
M3	11,46	7,27	347,08
M4	8,34	5,24	303,97
M5	6,92	8,19	339,05
M6	12,60	7,94	319,89
M7	12,90	8,16	297,54
M8	9,68	6,20	183,36
Valor promedio	10,85	7,35	304,94
			3.108,54

Tabla 3 Resultados de la prueba de compresión en frío aplicada en muestras de ladrillos nuevos

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión en frío (Mpa) (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (Mpa) (kg/cm ²)
X1	1,93	0,74	29,21
X2	1,20	0,47	15,72
X3	3,06	1,22	45,09
X4	3,20	1,21	49,49
X5	5,93	2,49	103,13
X6	5,58	2,35	91,91
X7	13,46	5,31	203,85
X8	3,52	1,37	27,05
Valor promedio	4,73	1,89	70,68
		19,32	720,94

Tabla 4 Porcentajes composicionales encontrados en la muestra de ladrillo 7145 mediante XPS

Compuestos	Zeolita	Caolita	CaCO ₃	SiO ₂	Fe ₃ O ₄	C-C	C-O	Al ₂ O ₃
Porcentajes	20,14	11,79	4,07	19,18	5,61	4,12	14,5	18,91

**Figura 4** Espectro amplio obtenido a partir de la muestra de ladrillo 7154 por la técnica XPS

La muestra 7146 fue sometida simultáneamente a pruebas de difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). Mediante las primeras fue

possible determinar las fases cristalinas de los compuestos formados, algunos en el proceso de cocción de la pieza de ladrillo y otros en cambio debidos a su exposición al ambiente cambiante de la región. Estos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Los resultados del análisis por difracción de rayos X (XRD) –efectuados en un difractómetro BRUKER AXS D8- se visualizan en la Figura 5 y se resumen en la Tabla 5. Los resultados de la prueba por FT-IR se muestran en la Figura 6 y ayudan en la identificación de los minerales presentes en las arcillas; adicionalmente sirven para validar los resultados anteriores.

A una de las muestras obtenidas a partir de los ladrillos nuevos (denominada 8765) se analizó por XRD usando los mismos equipos antes mencionados. Los resultados obtenidos de la muestra escogida aleatoriamente se presentan en la Tabla 6.

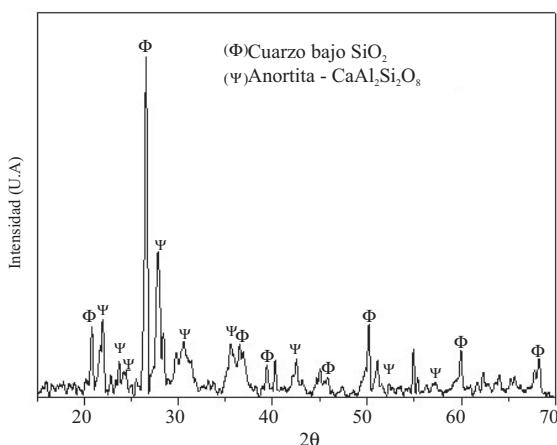


Figura 5 Difractograma de la muestra de ladrillo 7146 del Puente La Libertad en Buga

Tabla 5 Cuantificación relativa de las fases cristalinas presentes en la muestra de ladrillo 7146 (ladrillo antiguo) por la técnica XRD

Fase cristalina	Fórmula química	Porcentaje relativo
Cuarzo bajo	SiO ₂	34,60
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	65,4

Tabla 6 Cuantificación relativa de las fases cristalinas presentes en la muestra de ladrillo 8765 (ladrillo nuevo) por la técnica XRD

Fase cristalina	Fórmula química	Porcentaje relativo
Cuarzo bajo	SiO ₂	59,18
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	33,02
Hematita	Fe ₂ O ₃	7,8

Resultados y discusión

Los datos obtenidos en la caracterización física de las muestras de ladrillo (tabla 1) del puente La Libertad señalan cierto nivel de homogeneidad, lo que puede llevar a suponer dos cosas: la fuente arcillosa fue una sola y los procesos de producción de las piezas se llevaron a cabo por la mis-

ma mano de obra siguiendo prácticas rutinarias. De este mismo conjunto es notable el alto grado de porosidad aparente de las muestras (relación porcentual entre el total de poros abiertos y cerrados y el volumen aparente) cuyos valores oscilan en el rango 23,7% - 49,8%, siendo este factor un parámetro clave para predecir la durabilidad de ladrillos expuestos a fenómenos medioambientales [10, 11]. Una de las causas de esta característica puede ser la temperatura de quemado, la cual produce una serie de cambios físicos, mineralógicos y de textura que afectan a otros factores e influyen en la porosidad, aunque variaciones significativas en la composición y concentración de fases minerales también producen cambios en el sistema de poros de las piezas de ladrillo [12]. En climas tropicales como el de la ciudad de Buga, con elevadas concentraciones de humedad atmosférica, piezas de ladrillo muy porosas se ven fuertemente afectadas por la acción hídrica, más aun si ellas están expuestas a las crecidas del río Guadalajara tal como ocurre en las zonas inferiores del puente La Libertad. Además de una pérdida de su durabilidad, los ladrillos se convierten en huéspedes de agentes biológicos como hongos y líquenes. Si bien los valores de la resistencia a la compresión en frío (Tabla 2) obtenidos a partir de las muestras del puente La Libertad muestran también cierto grado de homogeneidad dentro del rango comprendido entre 53,45 kg/cm² y 84,29 kg/cm² (con un promedio de 75,00 kg/cm²), ellos son muy bajos comparados con los estándares colombianos según los cuales las unidades de arcilla macizas para mampostería estructural deben guardar una resistencia mínima a la compresión igual a 150 kg/cm² por unidad o 180 kg/cm² en promedios obtenidos a partir de 5 unidades [13]. No deja de sorprender que incluso mucho más bajos sean los valores de la resistencia a la compresión en frío de los ladrillos que actualmente se fabrican de manera artesanal (Tabla 3). También son esos valores obtenidos de los ladrillos antiguos del puente La Libertad inferiores a los que establece la American Society for Testing Materials [14] para ladrillos macizos mediante correlaciones entre tales valores y la resistencia de las piezas cerámicas a la intemperie: 211 kg/cm²

para ladrillos resistentes a condiciones severas, 176 kg/cm² en condiciones moderadas y 106 kg/cm² en condiciones despreciables. Debe tenerse en cuenta que en esta investigación las muestras fueron tomadas de la parte inferior de las bóvedas, allí donde las condiciones de humedad son extremas y en donde no se realiza prácticamente ninguna labor de mantenimiento o preservación. En cuanto a la caracterización mineralógica, el primero de los análisis, realizado mediante la técnica de XPS para la muestra de ladrillo 7145, muestra como principal componente a la zeolita (20,14 %) que junto a la caolita (11,79 %) representa los dos diferentes tipos de minerales de arcilla que conforman la muestra. Adicionalmente, la presencia de la hematita (5,61% para la muestra analizada y forma del hierro férrico Fe⁺³ que aparece cerca de los 850°C) es el indicador más valioso de su temperatura de quemado. Los minerales que aparecen después de la cocción - como aquellos registrados por el análisis XRD-, son una buena ayuda para hacer sugerencias sobre este mismo aspecto [15]. Gracias al análisis mediante XRD se constata el hecho que solo dos fases cristalinas (anortita sódica y cuarzo bajo) se hacen presentes: un hecho que obedece posiblemente a la pequeña cantidad de fases cristalinas que conforman la muestra, haciéndose algunas indetectables por este tipo de técnica de caracterización. Por otro lado, es posible pensar que en el procedimiento de fabricación de la pieza de ladrillo de la cual se extrajo esta muestra se hayan alcanzado temperaturas extremadamente altas que comprometieron el grado de cristalinidad de algunos compuestos que la integran. 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 llegar estos a una temperatura aproximada a los 900°C, razón por la que puede pensarse en una temperatura no superior a 1.000°C para la quema de la muestra analizada [3] y un porcentaje considerable de compuestos formados por calcio (Ca) en la materia prima. Es válido afirmar que la presencia de las diferentes fases mineralógicas en las muestras analizadas por XRD y XPS está en gran

parte relacionada con las características del proceso de quemado y que dichos minerales pueden variar de una muestra a otra por diferentes procedimientos de cocción, sin indicar esto que existan diferentes fuentes de materia prima. La comparación de los análisis XRD en ladrillos antiguos y ladrillos nuevos permite deducir que su composición mineralógica cuenta con elementos idénticos pero en proporciones diferentes: cuarzo y anortita. Por su parte, la presencia de hematita en los ladrillos nuevos explica su mayor coloración, probablemente a causa de condiciones propias de la fuente arcillosa. A partir de los resultados del análisis por FT-IR (Figura 6), es posible determinar que la banda más ancha y profunda establecida entre 3.200 cm⁻¹ - 3.600 cm⁻¹ con máximo en 3.420 cm⁻¹ se atribuye a las vibraciones del grupo funcional OH del H_2O introducida en algunos minerales durante su formación y/o exposición al ambiente. La banda entre 1.100 cm⁻¹ y 1.000 cm⁻¹ con máximo en 1.086 cm⁻¹ se atribuye al enlace Si-O-Si presente en la estructura de los filosilicatos en la muestra. Este pico es característico de la anortita [16], mineral cuya presencia se comprueba con el análisis XRD. Entre 780 cm⁻¹ y 800 cm⁻¹ se registra una banda con su máximo en 792 cm⁻¹ que representa la contribución del cuarzo a la muestra [17].

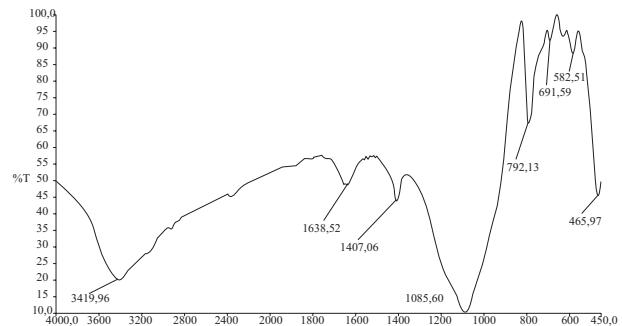


Figura 6 Espectro FT-IR de la muestra de ladrillo 7146 del puente La Libertad, en Buga

No es objetivo de esta investigación establecer correspondencias entre el comportamiento mecánico y la caracterización mineralógica de los ladrillos, sin embargo, es importante mencionar

que otros trabajos [18-20] han estudiado la influencia de la composición de las arcillas sobre la calidad de los ladrillos cocidos y coinciden en reportar los efectos positivos de cantidades moderadas de carbonatos que actúan como material fundente en la reducción de las contracciones y el comportamiento anisótropo y en el incremento de su capacidad resistente.

Conclusiones

Los resultados de la investigación llevada a cabo sobre las muestras tomadas del puente La Libertad hacen posible contar con algunas conclusiones preliminares válidas para estructuras antiguas construidas en ladrillo ya que las diferentes técnicas empleadas en la caracterización mineralógica permiten obtener información coherente. Por una parte, parece claro que los constructores locales de finales del siglo XIX aplicaban un conocimiento intuitivo para la solución de los problemas técnicos que enfrentaban incluso llegando a comprender el papel de la calidad de los materiales a emplear a partir de los procesos de su fabricación y de las características de sus materias primas, especialmente cuando la edificación tenía un alto compromiso estructural, tal como ocurre al momento de edificar un puente. Sin embargo, el paso del tiempo y la acción de diversos agentes afectan el desempeño mecánico y aceleran procesos de degradación de sus materiales constitutivos. Para el caso aquí estudiado, las características mecánicas y físico-químicas de las muestras examinadas pueden servir para definir especificaciones necesarias en la labor de producir ladrillos con características similares a las de los originales empleados en el puente: no son necesarias altas resistencias a la compresión, se recomienda usar piezas de reemplazo con baja elasticidad fabricadas a altas temperaturas de quemado y que preferiblemente, logren proporciones mineralógicas similares a las de las piezas originales a fin de garantizar su textura y color. Sin embargo, es necesario –progresivamente- adoptar metodologías mucho más precisas a través de rutinas específicas que tengan que ver con la naturaleza y calidad de los materiales y sus agregados, así como con sus características mecáni-

cas y reológicas. De hecho, cuando en un edificio histórico se hace necesaria la sustitución de muchas piezas cerámicas dañadas por otras nuevas, no basta con considerar solamente aspectos estéticos tales como su textura, tamaño y color, sino que es necesario que las unidades de reemplazo guarden similitudes con las originales en facetas relacionadas con su comportamiento mecánico e hídrico, por ejemplo, con el fin de evitar que se produzca una migración de condiciones de carga o humedad, respectivamente, hacia otras zonas del edificio.

Referencias

1. J. A. Galindo, J. A. Paredes. *Puentes de arcos de ladrillo en la región del Alto cauca. Una tradición constructiva olvidada*. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 2008. pp. 252-267.
2. J. Warren. *Conservation of Bricks*. Ed. Butterworths/ Heinemann. Oxford. 1999. pp. 132-146.
3. P. Cardiano, S. Ioppolo, C. Stefano, A. Pettignano, S. Sergi, P. Piraino. "Study and characterization of the ancient bricks of monastery of "San Filippo di Fragalà Razzanò (Sicily)". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 519. 2004. pp. 103-111.
4. P. Duminuco, M. P. Riccardi, B. Messiga, M. Setti. "Modificazioni tessitura e mineralogiche come indicatori della dinamica del proceso di cottura di manufatti ceramic". *Ceramurgia*. Vol. XXVI. 1996. pp. 281-288.
5. P. Duminuco, B. Messiga, M. P. Riccardi. "Firing process of natural clays. Some microtextures and related phase compositions". *Thermochimica Acta*. Vol. 321. 1998. pp. 185-190.
6. J. Capel, F. Huertas, J. Linares. "High temperature reactions and use of Bronze Age pottery from La Mancha central Spain". *Miner. Petrogr. Acta*. Vol. 29-A. 1985. pp. 563-575.
7. S. Shoval. "The firing temperature of a Persian-period pottery kiln at Tel-Michal, Israel, estimated from the composition of its pottery". *J. Thermal Anal.* Vol. 42. 1994. pp. 175-185.
8. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *NTC 674: Método de ensayo para determinar porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente por agua en ebullición de ladrillos refractarios y piezas refractarias quemadas*. Bogotá. Icontec. 2002. pp. 5-28.

9. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *NTC 682: Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en frío y el módulo de ruptura de refractarios*. Bogotá. Icontec. 2000. pp. 7-31.
10. A. E. Charola, L. Lazarini. "Deterioration of brick masonry caused by acid rain". *Am. Chem. Soc.* Vol. 25. 1986. pp. 250-258.
11. D. N. Winslow, C. L. Kilgour, R. W. Crooks. "Predicting the durability of bricks". *Am. Cera. Soc. for Testing Materials*. Vol. 33. 1988. pp. 527-531.
12. L. Valdeón, R. M. Esbert, C. M. Grossi. "Hydric properties of some Spanish building stones: a petrophysical interpretation". *Mater. Issues Art Archaeol.* Vol. 3. 1993. pp. 911-916.
13. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *NTC 4205: Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos*. Bogotá. Icontec. 2000. pp. 3-12.
14. American Society for Testing Materials – ASTM. *Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale)*. West Conshohocken. PA. USA: ASTM. 2000. pp. 2-16.
15. A. Moropoulou, K. Polikreti, V. Ruf, G. Deodatis. "San Francisco Monastery, Quito, Ecuador: characterisation of building materials, damage assessment and conservation considerations". *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 4. 2003. pp. 101-108.
16. B. Velde, Y. Syono, R. Couty, M. Kikuchi. "High pressure infrared spectra of diaplectic anorthite glass". *Journal Physics and Chemistry of Minerals*. Vol. 14. 1987. pp. 345-349.
17. S. M. Ainsworth. "Infrared Analysis of Respirable Coal Mine Dust for Quartz: Thirty Five Years". *Journal of ASTM International*. Vol. 2. 2005. pp. 215-230.
18. G. Cultrone, E. Sebastian, O. Cazalla, M. J. De la Torre López. "Physical, mineralogical and textural features of ceramic clays from Granada Province (Spain)". C.S.F. Gomes (Ed.) *Proceedings of the Second Mediterranean Clay Meeting*. Aveiro. Portugal. 1998. pp. 298-303.
19. T. Peter, R. Iberg. "Mineral changes during firing of calcium-rich brick clays". *Ceramic Bulletin*. Vol. 57. 1978. pp. 503-509.
20. M. S. Tite, Y. Maniatis. "Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope". *Nature*. Vol. 257. 1975. pp. 122-123.