

Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander

NELSON AFANADOR GARCÍA¹

ANDREA CAROLINA IBARRA JAIME²

CARLOS ALBERTO LÓPEZ DURÁN²

RESUMEN

Debido al fisuramiento temprano de paredes solicitadas por efectos gravitacionales, principalmente en viviendas de estratos 1 y 2, y al peligro al que estarían expuestas si se presentara un evento telúrico, se realizaron diferentes análisis a fin de caracterizar el material base y con ellos se elaboraron diseños de mezclas de arcilla para mejorar la pasta y la resistencia de los ladrillos; estos fueron quemados en el horno artesanal del tejero y en un horno mufla para observar el cambio en sus propiedades físicas y mecánicas, a efectos de determinar la calidad de las piezas de mampostería. Estos diseños de mezclas se realizaron adicionando cal y variando los porcentajes de las muestras base según su composición química y mineralógica hasta alcanzar porcentajes de absorción de agua, resistencias a la compresión y flexión apropiados; además, se determinaron parámetros básicos de diseño.

Palabras clave: arcilla, caracterización, mezclas de arcilla, pasta cerámica, ladrillo.

¹ Ingeniero civil, Universidad de la Salle. Ms.C. en Ingeniería Civil énfasis en Estructuras. Universidad de los Andes, Colombia. Investigador Línea de Materiales y Sísmica. Docente Asistente, Facultad de Ingeniería Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (UFPSO), Colombia. Correo electrónico: nafanadorg@ufpso.edu.co

² Ingeniero(a) civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (UFPSO), Colombia. Correos electrónicos: andrea03@hotmail.com e ingcarlosalbertolopez@hotmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN: 12 DE FEBRERO DE 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 5 DE MAYO DE 2013

Cómo citar el artículo: Afanador García, N.; Ibarra Jaime, A. C. y López Durán, C. A. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Épsilon* (20), 101-119.

Characterization of Clays Used in Ceramic Paste for Brick Elaboration in Ocaña, Norte de Santander

ABSTRACT

Due to the early cracking of walls caused by gravitational effects, particularly in houses of social strata 1 and 2, and due to the danger they would be exposed to in case of an earthquake, different analysis were performed in order to characterize the base material and designs of clay mixtures were elaborated to improve the paste and resistance of the bricks. The bricks were burned in a traditional kiln and in a muffle furnace to observe the changes in their physical and mechanical properties and determine the quality of the masonry pieces. The design of the mixture was carried out adding lime and changing the percentages of the base samples according to their chemical and mineral composition until appropriate water absorption, compression resistance and flexion percentages were reached. In addition, basic design parameters were determined.

Keywords: Clay, characterization, clay mix, ceramic paste, brick.

Caracterização de argilas empregadas em pasta cerâmica para a elaboração de tijolos na zona de Ocaña, ao Norte do Estado de Santander

RESUMO

Devido às fissuras precoces nas paredes solicitadas por efeitos gravitacionais, principalmente em viviendas de estratos 1 e 2, e ao perigo ao que estariam expostas em caso de que se apresentasse um evento telúrico, se realizaram diferentes análises a fim de caracterizar o material base e com eles forma elaborados desenhos de misturas de argila para melhorar a pasta e a resistência dos tijolos; estes foram queimados no forno artesanal do telar e em um forno mufla para observar a mudança em suas propriedades física e mecânicas, a efeitos de determinar a qualidade das peças de alvenaria. Estes desenhos de misturas se realizaram adicionando cal e variando as porcentagens das amostras base de acordo à sua composição química e mineralógica até alcançar porcentagens de absorção de água, resistências à compressão e flexão apropriados; além disso, foram determinados parâmetros básicos de desenho.

Palavras chave: argila, caracterização, misturas de argila, pasta cerâmica, tijolo.

Introducción

A través de la historia se ha visto la importancia que ha adquirido el ladrillo como un material indispensable en la construcción, y un dominante en cuanto a cantidades de comercialización se refiere a nivel mundial. La principal materia prima en la elaboración de las piezas de mampostería es la arcilla, la cual es un material plástico natural en presencia de agua que permite ser moldeada para luego adquirir una dureza que aumenta considerablemente después de la cocción. En Ocaña es muy utilizada la mampostería debido al bajo costo que ha alcanzado para solucionar problemas de vivienda. Los tejares o “chircales” se encuentran en la zona rural y allí la selección de las arcillas y el control de calidad son nulos para el ladrillo tipo tolete macizo, su principal producto.

La composición química y mineralógica de las arcillas es una de las características más empleadas para definir las mezclas utilizadas en la fabricación de piezas de mampostería pues influye directamente en las propiedades mecánicas y físicas de los productos cerámicos obtenidos. Un alto contenido de dióxido de sílice (SiO_2) encontrado en el análisis químico (resultado extraído del ensayo de absorción atómica) permite estimar un bajo porcentaje de contracción en los ladrillos elaborados con esta arcilla debido a su baja plasticidad, al igual que un alto contenido de cuarzo (tomado del ensayo de difracción de rayos X) indica un alto contenido de material desgrasante (arena).

La plasticidad es una propiedad que debe ser controlada pues la arcilla, en presencia de agua, forma una masa plástica que permite ser moldeada, el método más utilizado para determinarla es el límite de Atterberg (Bowles, 1997), compuesto por el límite plástico (NTC, 2006a), es decir, la mínima humedad que se requiere para que una arcilla pueda ser moldeada; el límite líquido (NTC, 2006b) es el porcentaje de humedad del suelo secado en el horno cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico, y el índice de plasticidad (NTC, 2006a), el cual es la diferencia entre los límites plástico y líquido, y señala el rango de trabajabilidad de las arcilla.

La distribución granulométrica es importante pues de ella depende la superficie específica del ladrillo (Fernández, 2000), en cuanto mayor sea el empaquetamiento de las partículas (es menor la sección de poros y aumenta el contacto entre las par-

tículas de arcillas) mejores propiedades físico-mecánicas tendrá (resistencias a la flexión y compresión, absorción de agua, tasa inicial de absorción, porosidad, etc.).

Este trabajo de investigación presenta los resultados de la caracterización de las mezclas de arcilla utilizadas en la elaboración de ladrillo tolete macizo para un caso de estudio en el municipio de Ocaña y establece las mejores combinaciones de arcillas con fines de mejoramiento de las resistencias a la compresión y flexión, resistencia a la compresión de prismas y tracción diagonal, absorción final y tasa inicial de absorción.

Materiales y métodos

El área de estudio comprende el municipio de Ocaña, Norte de Santander, enmarcada dentro las coordenadas geográficas $X = 1.077.500$ a $1.082.000$ y $Y = 1.401.000$ a $1.407.000$ su extensión aproximada es de $7,74 \text{ km}^2$ de área urbana. En el municipio se registran 16 chircales activos que producen aproximadamente 352.000 ladrillos/mes ubicados en diferentes zonas aledañas al casco urbano de la ciudad (Oficina de Planeación Municipal, 2012); el material objeto de esta investigación hace parte de la formación complejo intrusivo-extrusivo, compuesta por rocas ígneas félsicas, las cuales afloran en zonas de alta pendiente alrededor del perímetro urbano, además presenta un alto grado de meteorización y es susceptible a los procesos erosivos; debido a su baja consolidación y al alto grado de meteorización, el material es propenso a los procesos morfodinámicos caracterizados por erosión laminar, en surcos y cárcavas localizadas (Oficina de Planeación Municipal, 2012). En la elaboración del ladrillo tolete macizo se utilizan arcillas de color rojizo y verdoso, y arenas que varían de marrón a gris.

Se tomaron 270 kg de muestra por cada tipo de arcilla y arena de los diversos puntos de explotación utilizados en la elaboración del ladrillo, la cual fue disgregada manualmente mediante una porra para realizar un proceso de selección de 4 kg por roleos y cuarteos sucesivos para ensayos de caracterización mineralógica por difracción de rayos X (DRX), granulométrica por tamizado, sedimentación (hidrómetro) y límite plástico (límites de Atterberg). La pasta cerámica utilizada en el ladrillo macizo fue preparada con diferentes dosificaciones para obtener el máximo aprovechamiento en la elaboración de ladrillo con calidad, es decir, mejoramiento en la resistencia a la compresión y las absorciones de agua. Todas estas mezclas fue-

ron preparadas, conformadas, secadas, sinterizadas y caracterizadas según se indica a continuación: al material se le realizó un ajuste granulométrico debido al gran número de partículas grandes que lo componían, este ajuste se hizo triturando el material con un pisón metálico, posteriormente fue cernido pasándolo por un tamiz #10 para alcanzar la mayor finura posible a fin de obtener una mejor homogeneidad en el amasado. Se agregó agua hasta conseguir una pasta homogénea dejándola en un proceso de maduración durante 24 horas, y posteriormente se realizó la pasta cerámica mediante un pisado con los pies y amasándola con las manos, en un proceso similar al utilizado de forma artesanal por los fabricantes de la zona.

La pasta lista fue retirada con una carretilla y subsecuentemente se procedió al moldeo mediante una gradilla cuyas dimensiones interiores son $70 \times 120 \times 250$ mm la cual fue puesta en el suelo, cuya superficie contenía una capa de arena que sirvió como antiadherente a fin de que los ladrillos no se pegaran a la superficie, a continuación se llenaron los espacios de la rejilla compactándose manualmente, y con un cuchillo se pasó por las paredes de la gradilla para que estos no se pegaran cuando fuera retirada. Por último, se agregó agua con una esponja a la superficie de los ladrillos para darle un mejor acabado y posteriormente retirar el molde. Pasadas las primeras 24 horas se colocan los ladrillos de canto y a las 48 horas se organizan en hileras en un cancel dejando suficiente espacio para que el aire circule libremente a fin de aumentar la velocidad de secado.

Con el objetivo de comparar los procesos de cocción se utilizó un horno artesanal construido en ladrillo macizo y un horno mufla, marca Gabrielli modelo C72. La curva de cocción (Centro de Investigación de Materiales Cerámicos, 2011) seleccionada para el horno mufla indicó una velocidad de cocción de $1,7^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar los 1000°C , con el fin de evitar cambios bruscos en la cocción (Cultrone *et al.*, 2004). Los ladrillos se acomodaron en hileras en el horno artesanal dejando un pequeño espacio entre ellos para adicionarles el material de quemado, es decir, carbón mineral. Por último, los ladrillos obtenidos con las diferentes pastas se caracterizaron física y mecánicamente mediante la determinación de contracción (ASTM C326, 2009), absorción de agua, tasa inicial de absorción, módulo de rotura, resistencia a la compresión, resistencia a la compresión en prismas y resistencia a la tracción diagonal, verificando el cumplimiento de la norma NTC 4205 (NTC, 2000) como criterio para la selección de pastas más adecuadas para la elaboración de ladrillos.

Resultados y discusión

Caracterización de las arcillas

Esta investigación tomó como caso de estudio el chircal ubicado en la vereda El Estanco debido a que tiene la misma formación geológica y de características similares a los demás chircales. Este fabricante utiliza cuatro suelos de diferentes propiedades (muestras M1, M2, M3 y M4), con porcentajes de 35,29 para las muestras M1 y M3 y 14,71 para las muestras M2 y M4, la asociación de estas muestras permitió obtener la mezcla de arcilla para la fabricación de ladrillos denominada M5.

Composición química y mineralógica

El análisis químico realizado a la materia prima utilizada en la pasta se indica en la tabla 1. Las arcillas aptas para la fabricación de ladrillo cerámico deben contener SiO_2 entre el 64,1-83,1 %, Al_2O_3 entre el 21,6-27,1 % y 3,0-6,1 de Fe_2O_3 (Duitama *et al.*, 2004), las muestras M2 y M4 por sí solas no son las más apropiadas para la fabricación de ladrillos cerámicos, pues aunque tienen un buen contenido de SiO_2 y Fe_2O_3 no alcanzan el porcentaje necesario de Al_2O_3 ; por otro lado, las muestras M1 y M3 exceden el contenido de sílice y tienen baja cantidad de aluminio.

Tabla 1. Análisis químico de las arcillas por absorción atómica

COMPONENTE	M1	M2	M3	M4	M5
SiO_2 (%)	89,00	69,60	85,20	72,00	84,20
Al_2O_3 (%)	3,52	8,12	5,69	7,78	6,22
Fe_2O_3 (%)	1,96	5,89	2,70	4,72	3,37
CaO (%)	0,18	1,23	0,48	0,052	0,49
K_2O (%)	0,055	0,30	0,087	0,051	0,15
Na_2O (%)	0,024	0,058	0,027	0,005	0,044
MgO (%)	0,25	1,49	0,38	0,20	0,51

Fuente: Afanador e Ibarra (2012a).

Debido a su alto contenido de sílice en las muestras M1 y M3, con 89 y 85,2 % respectivamente, estas arcillas pueden ser utilizadas para prevenir la retracción, pero producen un ladrillo frágil especialmente a sollicitaciones de compresión

y flexión, unido a una temperatura de cocción en el horno artesanal que no alcanza el grado de sinterización del sílice pues la máxima temperatura obtenida es de 803,3 °C (Guerrero, 2011) como se indica en la figura 1, para una serie de 119 posiciones dentro del horno. Los bajos contenidos de aluminio en todas las muestras repercuten directamente en la disminución de la resistencia mecánica de las piezas de mampostería, mientras que las muestras M1 y M3 no tienen los contenidos de óxido de hierro necesarios para mejorar la impermeabilidad, durabilidad, resistencia y dureza.

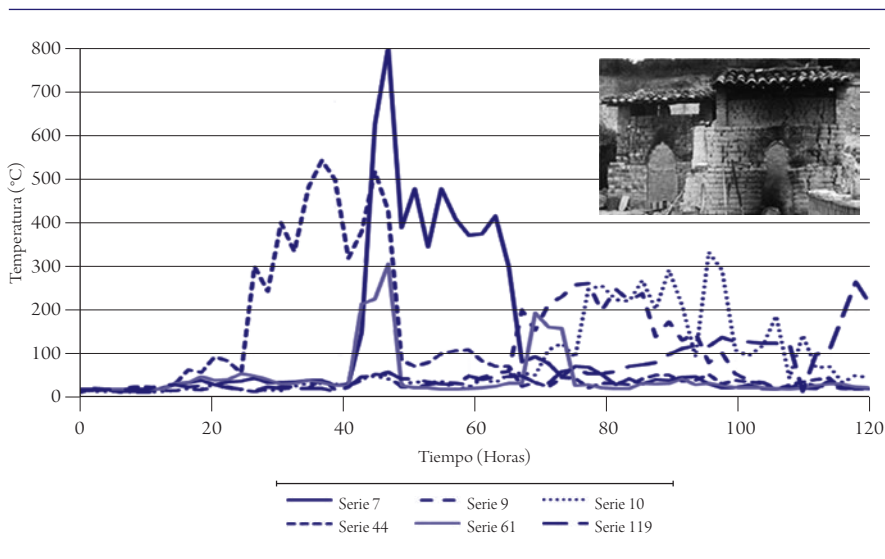


Figura 1. Curva de cocción en horno artesanal

Fuente: Guerrero (2011).

Granulometría

La figura 2 indica la curva de distribución de tamaño de partículas por tamizado en seco (NTC 1979) y por hidrómetro (Invías, 1979). Las muestras M1 y M3 tienen altos porcentajes de arenas (38,03 y 41,60 % respectivamente), y las muestras M2 y M4 altos porcentajes de finos (71,93 y 56,53 % respectivamente), con lo que se obtiene una mezcla areno-arcillosa con porcentaje de material arenoso de 36,26 % y de finos de 50,12 %, esto debido a que las muestras M1 y M3 contienen altos porcentajes de material desengrasante y las restantes poseen materiales arcillosos.

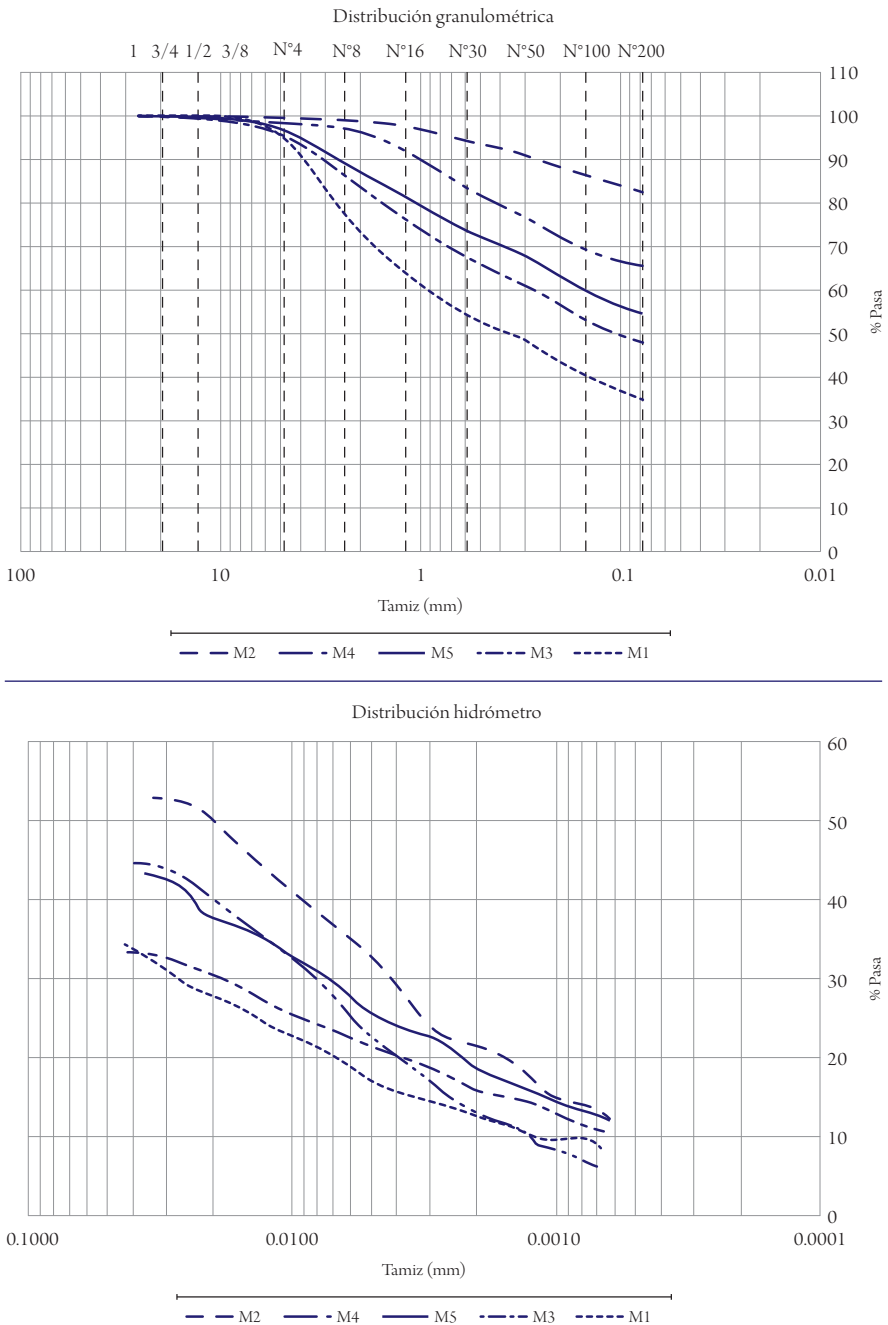


Figura 2. Distribución granulométrica y por hidrómetro de material para elaboración de ladrillos

Fuente: Ibarra y López (2012).

Plasticidad

Los límites de Atterberg —límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad— se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Límites de Atterberg del material para elaboración de ladrillos

ENSAYOS	M1	M2	M3	M4	M5
Límite líquido (LL)	25,98	50,21	38,55	48,68	36,01
Límite plástico (LP)	19,40	19,10	17,50	38,60	16,06
Índice de plasticidad (IP)	7,00	31,00	21,00	10,00	19,00

Fuente: Ibarra y López (2012).

El diagrama de Casagrande (Das, 2001) permite definir si la plasticidad de cada muestra es alta, media o baja mediante el límite líquido y el índice de plasticidad. La muestra M5 es una arcilla inorgánica de mediana plasticidad, CL (según sistema unificado de clasificación de suelos SUCS) (figura 3), debido a que las muestras

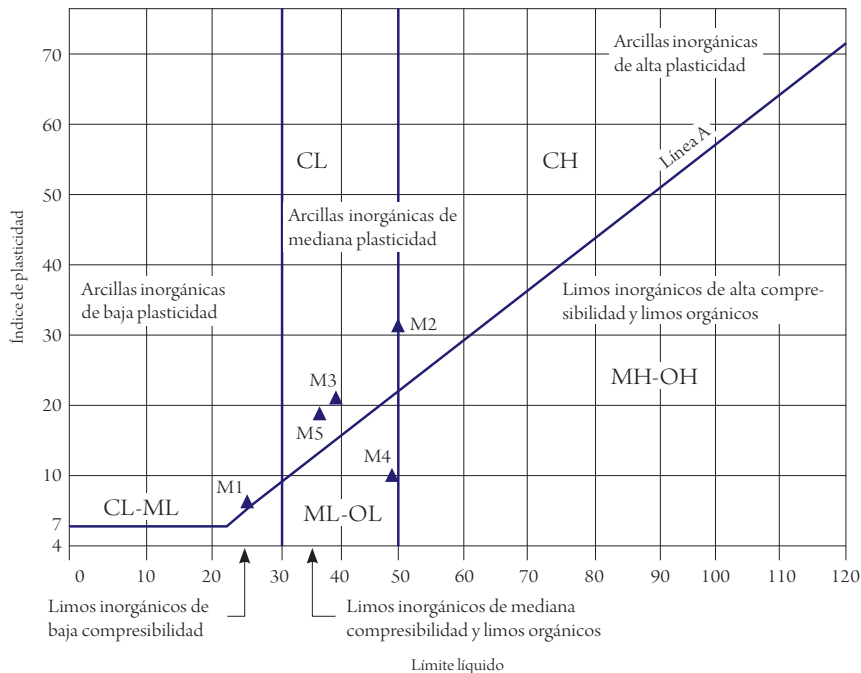


Figura 3. Diagrama de Casagrande para muestras M1 a M5

Fuente: Ibarra y López (2012).

M2 y M4 tienen alta plasticidad (figura 3), del orden del 50,21 y 48,68 % (límite líquido) respectivamente, obteniendo con esto materiales arcillosos, y las muestras M1 y M3 contienen bajos contenidos de plasticidad (límite líquido de 25,98 y 38,55 %, respectivamente), con lo que se logran propiedades desgrasantes en la mezcla de arcilla que concuerdan con los resultados granulométricos de las muestras para la realización de ladrillos.

Mezclas de arcilla

Con el fin de disminuir la temperatura de sinterización del Sílice, a la mezcla de arcilla utilizada por el fabricante se le adicionó un fundente, cal viva (óxido de calcio, CaO) para la realización de ladrillos en un porcentaje del 10 y 20 % en relación con el peso del material, y además se elaboró una mezcla con el 10 % de cal hidratada (hidróxido de calcio, Ca(OH)₂) con el fin de establecer la mejor dosificación, pues estas mezclas reducen la temperatura de sinterización del sílice y disminuyen las contracciones en secado y cocción (Ibarra, 2004; Betancourt *et al.*, 2007) debido a que los hornos artesanales no tienen una temperatura uniforme y además presentan temperaturas por debajo de los 803,3° (Guerrero, 2011).

Los resultados obtenidos a nivel de resistencia a la compresión disminuyeron en el óxido de calcio en un 48,7 % en promedio, en las dos dosificaciones, mientras que en el hidróxido de calcio fue del 59,8 %; por otro lado, las absorciones de agua a las 24 horas sumergido aumentaron significativamente, ya que la cal viva (promedio del 10 y 20 %) fue 94,9 % mayor a la inicialmente reportada, mientras la cal hidratada aumentó el 100,03 %. Las contracciones en el óxido de calcio fueron en promedio del 3,64 % en seco y del 0,63 % en cocción, mientras que el hidróxido de calcio fue del 3,42 % en seco y del 0,34 % en cocción, tomando como referencia la longitud del ladrillo. Aunque estos resultados favorecieron las contracciones en secado principalmente, las resistencias a la compresión y las absorciones de agua estuvieron bajas y altas respectivamente, lo cual indica que el material fundente se encuentra en mayor medida y debe estar muy por debajo del 10 % del peso del material adicionado para disminuir la temperatura de sinterización del sílice aumentando la cocción de la arcilla, disminuyendo las absorciones de agua y las contracciones en seco y en cocción, aunque no se observan mayores aumentos en la resistencia a la compresión principalmente.

Se realizó una nueva propuesta de dosificación de materiales teniendo en cuenta la composición química, granulométrica y plástica de tres muestras (M1, M2 y M4), no se utilizó M3 debido a su mediana plasticidad ($LL = 38,55\%$) y dureza en las partículas que impedían la compactación en el proceso de moldeo de la pasta para ladrillos. Por ser la muestra M1 una arena limo-arcillosa, con plasticidad baja y alto contenido de sílice, se empleó en la mezcla como un material desgrasante con el fin de ajustar la plasticidad de la pasta. Por otra parte, la muestra M2 es una arcilla inorgánica de alta plasticidad ($LL = 50,21\%$), con un contenido de sílice de $69,6\%$, aluminio de $8,12\%$ y óxido de hierro de $5,89\%$, por lo que se caracteriza como un material de mejor ajuste a la composición química óptima para la construcción de ladrillos. Por último, la muestra M4 fue utilizada para darle el color rojizo propios de las piezas de mampostería y por su composición química y plástica. Estas muestras fueron dosificadas variando el porcentaje en peso de la muestra M2 para un 35, 40 y 43 %, mientras que la muestra M1 varió 40, 40 y 43 % y la muestra M4 cambió a 25, 20 y 15 %, respectivamente.

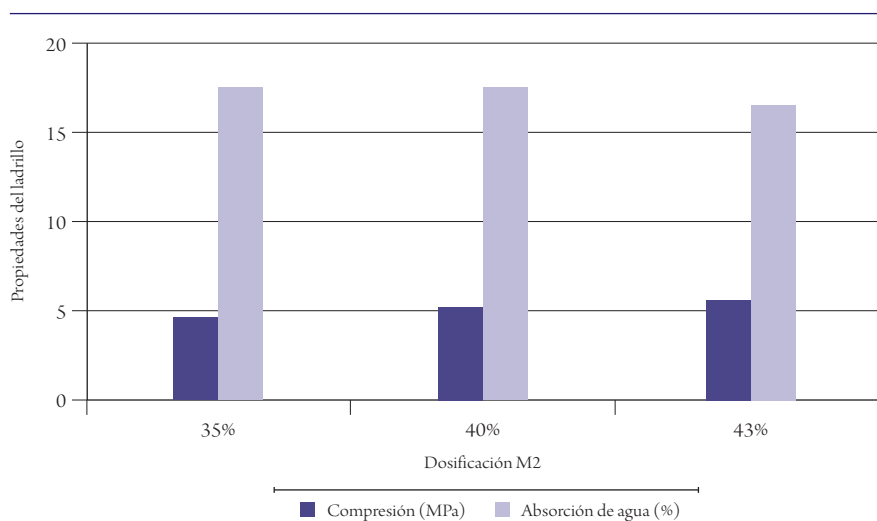


Figura 4. Resultados de resistencia a la compresión y porcentaje de absorción de agua con variación de M2

Fuente: Ibarra y López (2012).

A medida que aumentan los limos disminuye el porcentaje de absorción de agua a las 24 horas de un 17,49 a 16,45 %, mientras que la resistencia a la compresión aumenta del 4,64 a 5,64 MPa para las mezclas M2 con porcentajes de 35 y 43 % respectivamente (figura 4). Aunque en la resistencia a la compresión se observa

una mejoría, en la resistencia mecánica no es suficiente para lo establecido de 10 MPa (NTC, 2000); así mismo, el porcentaje de absorción de agua excede el máximo permitido del 15 % (NTC, 2000), lo que indica que no tendría un fraguado eficiente con el mortero de pega, dando al traste con la resistencia a la compresión de dicho mortero y a la presencia de fisura en la unión ladrillo-mortero.

Los resultados de absorción atómica de cada una de las muestras se compararon con la composición química establecida en el uso de cerámica para alfarería común, dando como resultado que la mezcla de arcilla utilizada M5 contiene un alto porcentaje de óxido de sílice (SiO_2), superior al rango de 64-83 %, y un bajo contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3), inferior a lo establecido entre el 21-27 %, obteniéndose una arcilla no apta para la fabricación de ladrillos. La composición química de la muestra M4 no se aleja del rango óptimo, pues tiene un contenido de sílice del 72 %, aluminio del 7,78 % y óxido de hierro del 4,72 %, además, es un material de mediana plasticidad ($\text{LL} = 48,68 \%$), por tal motivo se aumentó su porcentaje en la elaboración de la mezcla M5 necesaria para la elaboración de ladrillos. Las muestras fueron dosificadas variando el porcentaje en peso de la muestra M4 para un 20, 25 y 30 %, mientras que las muestras M1 y M3 variaron entre el 27,5, 30 y 32,5 %, y la muestra M2 se mantuvo en un 15 %.

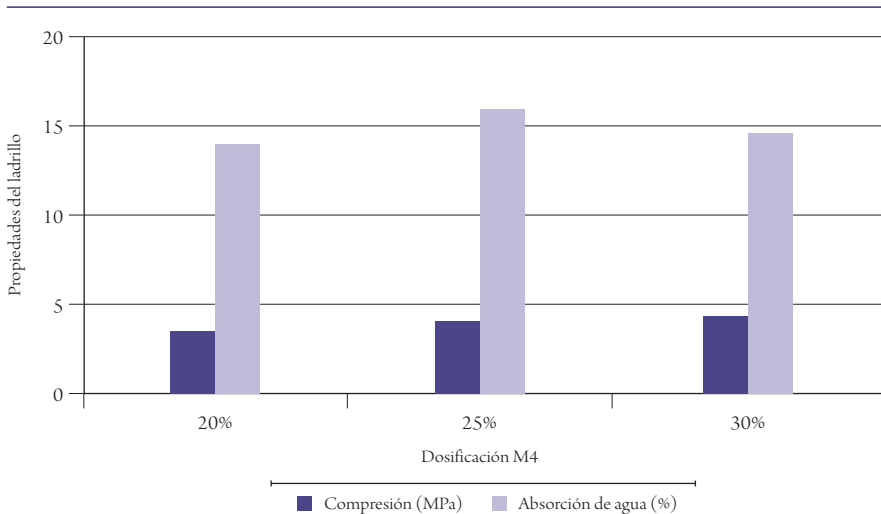


Figura 5. Resultados de la resistencia a la compresión y porcentaje de absorción con variación de M4

Fuente: Ibarra y López (2012).

Al aumentar el porcentaje de arcilla M4 (caolín) se mantuvieron por debajo del 15 % de absorción de agua establecido en la NTC 4205, mientras la resistencia a la compresión estuvo en el rango entre 3,45 a 4,29 MPa (figura 5) (la mezcla M4 aumentó del 20 al 30 % de peso), inferior al reportado variando M2 pero mejorando la absorción de agua. La resistencia a la compresión representan entre el 34,5 al 42,9 % de la resistencia mínima establecida (NTC, 2000) de 10 MPa, pero aumenta la resistencia inicial a la compresión de un 2,25 a 4,23 MPa, lo que significa un aumento en la resistencia inicial del 88,20 %, esto tan solo optimizando la mezcla utilizada con los materiales cercanos al chircal.

Mezcla seleccionada

La mezcla al 30 % de M4 fue la más adecuada para la fabricación de ladrillos con los materiales utilizados por el chircal debido a que no excede la absorción a las 24 horas, presenta un aumento en la resistencia a la compresión y su caracterización granulométrica la define como una arcilla de mediana plasticidad. A esta mezcla se le realizó caracterización mineralógica y química, granulométrica y límites de Atterberg; posterior a esto se fabricaron piezas de mampostería a las cuales se les realizaron ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura, absorción de agua, tasa inicial de absorción, resistencia a la compresión en prismas de mampostería y resistencia a la tracción diagonal en muretes.

La curva de distribución de tamaño de partículas por tamizado en seco (NTC 1979) y por hidrómetro (Invias, 1979) de la muestra seleccionada (30 % de M4) tiene altos porcentajes de finos (limos y arcillas con un 48 %) y un contenido de arenas (43,11 %), obteniendo una mezcla arcillosa inorgánica de mediana plasticidad (CL), según clasificación de la USCS, debido a que las muestras M1 y M3 contienen altos porcentajes de material desengrasante (55 % del peso de la muestra) y las restantes poseen materiales arcillosos.

La mezcla 30 % de M4 tiene buena trabajabilidad debida a que el índice de plasticidad fue del 17,00 %, obteniendo una pasta de mediana plasticidad pues con una adición de agua fue del 36,05 % la cual se encontró en el rango entre el límite plástico (23,20 %) y el límite líquido (40 %), alcanzando las condiciones de plasticidad adecuadas para el conformado del ladrillo.

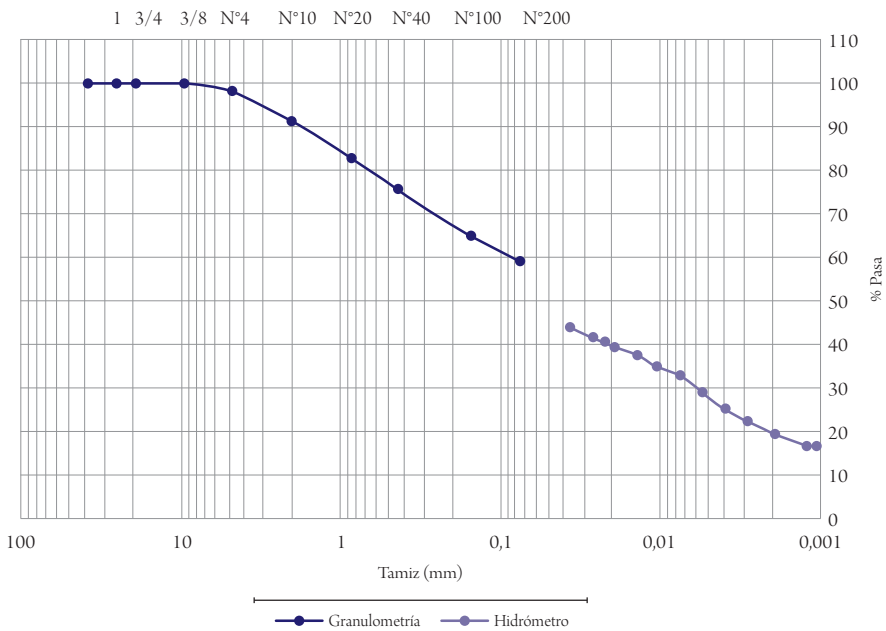


Figura 6. Distribución granulométrica y por hidrómetro de material al 30 % de M4 para elaboración de ladrillos

Fuente: Ibarra y López (2012).

Para el análisis mineralógico se tomó una muestra de 10 g triturada y pasada por el tamiz # 200 a fin de identificar y cuantificar las fases cristalinas de la mezcla para ladrillos, siendo pulverizada en un mortero de ágata y llevada a un tamaño de 38 μm (400 mesh). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. Este ensayo se realizó en un difractómetro de polvo marca Bruker modelo Advance con Geometría DaVinci. Se realizó un análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), y el análisis cuantitativo de las fases encontradas mediante el refinamiento por el método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (Aluminum oxide, Corundum, α -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20 %. La tabla 3 indica los minerales presentes en la mezcla seleccionada como óptima.

Tabla 3. Análisis mineralógico de la muestra 30 % de M4

FASE		NOMBRE	ANÁLISIS CUANTITATIVO (%)
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	10,7
	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Crisotilo	7,3
	Na(AlSi ₃ O ₈)	Albita	7,8
	KAlSi ₃ O ₈	Ortoclasa	6,3
	Al ₂ (Si ₂ O ₃)(OH) ₄	Caolinita	17,4
	Fe ₂ O ₃	Hematita	0,8
	(Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ x H ₂ O	Montmorillonita	3,9
	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	4,4
	SiO ₂	Cristobalita	N.C
	K _{0,86} A _{11,94} (A _{10,965} Si _{2,895} O ₁₀)(OH) ₂	Moscovita	7,9
Total cristalino			66,5
Amorfos y otros			33,5

Fuente: Afanador *et al.* (2012).

Según los resultados del análisis mineralógico (tabla 3) predominan el cuarzo y la caolinita, el cuarzo brinda propiedades desgrasantes y la caolinita confiere propiedades plásticas. Por el alto contenido de cuarzo (10,7 %) se esperarían resistencias mecánicas bajas. El material presentó hematita del 0,8 %, la cual confiere el color rojo a la cerámica, y montmorillonita de 3,9 % obteniendo piezas con altas contracciones en el secado.

Tabla 4. Caracterización física y mecánica de los ladrillos producidos con la muestra 30 % de M4

ENSAYOS	(AFANADOR <i>ET AL.</i> , 2012B)	MEZCLA 30 % M4	INCREMENTO (%)	NORMATIVO
Compresión (f'_{cu}) (MPa)	2,25	4,23	88,20	10
Módulo de Rotura (MPa)	1,02	1,31	28,05	-
Tasa Inicial de Absorción (TIA) (g/cm ² /min)	0,26	0,21	-	0 ≤ TIA ≤ 0,30
Absorción de Agua (AF) (%)	15,20	14,59	-	AF ≤ 15 %

Fuente: Ibarra y López (2012).

La caracterización físico-mecánica de los ladrillos obtenidos con la mezcla 30 % de M4 se indica en la tabla 4, donde la resistencia a la compresión y módulo de

rotura presentaron un incremento del 88,20 y 28,05 % respectivamente, comparados con los que tenía inicialmente el tejar (Afanador 2011); estos valores no alcanzaron lo establecido (NTC, 2000) aunque se consiguió mejorar la mezcla. Se logró disminuir la absorción de agua y la tasa inicial de absorción a fin de cumplir con lo señalado en la NTC 4205 (NTC, 2000). En el ensayo de tracción diagonal (ASTM, 2007) se alcanzaron esfuerzos de corte máximos de 43,84 MPa para una deformación unitaria del 2,28 % con un módulo de rigidez al corte G de 2.904,81 MPa, siguiendo la metodología planteada por Ismail et ál (2011); el ensayo de tracción diagonal describió un comportamiento lineal (figura 7), considerando una relación de Poisson de 0,25 se tiene un módulo de elasticidad longitudinal de 5.810,87 MPa < 20.000 MPa (AIS, 2010).

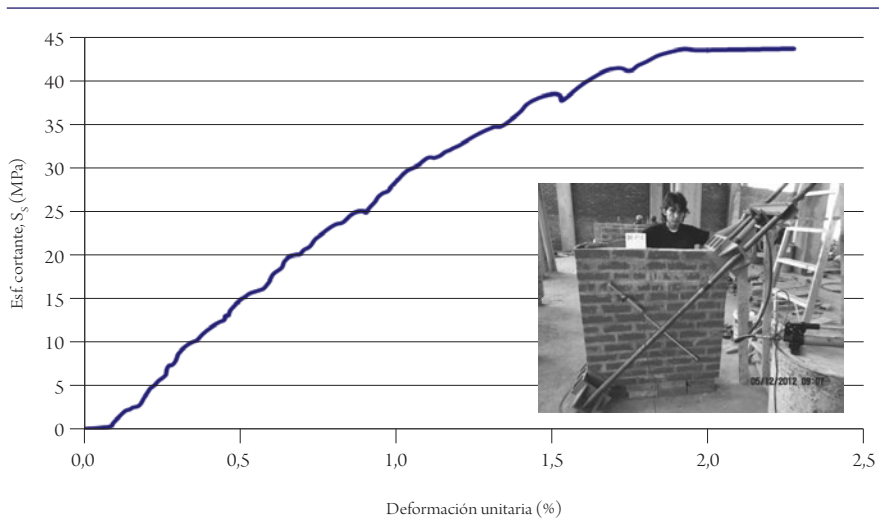


Figura 7. Comportamiento del esfuerzo de corte frente a deformación unitaria del material al 30 % de M4 para elaboración de ladrillos

Fuente: Ibarra y López (2012).

Conclusiones

La mezcla utilizada (M5) para la fabricación de piezas de mampostería, aunque tiene mediana plasticidad, presentó altos contenidos de sílice (84,20 %) y bajo contenido de aluminio (6,22 %), unido a pobres procesos de cocción (temperatura máxima alcanzada en el horno de 803,3 °C) que generaron ladrillos crudos los cuales dan baja resistencia a la compresión y a la flexión.

Fue posible el mejoramiento de las propiedades mecánicas y física de los ladrillos producidos por el chircal mediante la variación de M4 (caolín) hasta en un 30 % del peso de la muestra, obteniéndose aumentos en la resistencia a la compresión y en flexión del 88,20 y 28,05 % respectivamente, además presentó buena trabajabilidad en el moldeo, con un 36,05 % en la humedad de la arcilla —23,2 % (LP) y un 40 % (LL)— alcanzando las condiciones de plasticidad adecuadas para el conformado. Un análisis de los minerales presente en la mezcla 30 % de M4 indicó cuarzo como material desgrasante, caolinita que confiere la propiedad plástica y montmorillonita responsable principalmente de las contracciones las cuales fueron del 7,94 % en seco, en referencia a su longitud.

Los procesos de fabricación artesanal son débiles y presentan alta variabilidad en sus resultados pues carecen de métodos adecuados para la trituración, el amasado, la compactación, el secado y la cocción, produciendo unidades menos densas, aumento en el porcentaje de poros y disminución de resistencias debido principalmente a su preocupación por mantener rentable la producción sin tener como consigna principal la calidad de la pieza de mampostería.

Se determinaron los parámetros de diseño necesarios a fin de realizar modelos matemáticos que permitan determinar su vulnerabilidad ante diferentes sollicitaciones y determinar procesos de reforzamiento.

Referencias

- Afanador, N. (2011). Proyecto de Investigación “Propiedades físico mecánicas en macizos cerámicos para mampostería”. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.
- Afanador, N. e Ibarra, A. (2012a). Proyecto de Investigación “Diseño de mezcla de arcilla para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los ladrillos producidos en Ocaña”. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.
- Afanador, N., Guerrero, G. y Monroy, R. (2012b). Propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos macizos cerámicos para mampostería. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22 (1), 43-58.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2007). *Standard test method for Diagonal tension (shear) in masonry assemblages (ASTM E519)*. Pennsylvania: West Conshohocken.

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2009). *Standard test method for drying and firing shrinkages of ceramic whiteware clays (ASTM C326)*. Pennsylvania: West Conshohocken.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Norma sismorresistente 2010. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. Bogotá D.C.
- Betancourt, D., Martinera, F., Day, R. y Díaz, Y. (2007). Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. *Revista ingeniería de construcción*, 22 (3).
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design*. Chicago: McGraw-Hill.
- Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., De La Torre, M., Cazalla, O., and Rodríguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 547-564.
- Das, B. M. (2001). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4ta edición. México: International Thomson Editores.
- Duitama, L., Espitia, C., Mojica, J., Quintero, J. y Romero, F. (2004). Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en la zona de Medellín, Itagüí y Amagá. *Revista Academia Colombiana de Ciencia*, XXVIII (109).
- Fernández, M. (2000). *Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos*. España: Laboratorio Técnico Cerámico C.B.
- Guerrero, G. (2011). Proyecto de investigación "Eficiencia energética y uso racional de la energía en la producción de material cerámico en la región". Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO).
- Ibarra, F. (2004). Diseño de una máquina semiautomática moldeadora de ladrillo de barro de 5,5x13x24 cm de dimensiones, con una capacidad de 500 ladrillos por hora, utilizable en la industria ladrillera (tesis profesional). Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas, Puebla.
- Ibarra, A. C. y López, C. A. (2012). Análisis de los componentes químicos de la mezcla de arcilla en ladrillos del chircal Granito de Oro en Ocaña (trabajo de grado Ingeniería Civil). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (NTC) (1979a). *Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado (NTC 1522)*. Bogotá D.C.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (NTC) (2000). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos (NTC 4205)*. 1ra ratificación. Bogotá D.C.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (NTC) (2006a). *Suelos. Ensayo para determinar el límite plástico e índice de plasticidad (NTC 1493)*. 1ra ratificación. Bogotá D.C.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (NTC) (2006b). *Suelos. Ensayo para determinar el límite líquido (NTC 1494)*. 1ra ratificación. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías (Invias) (1979b). *Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (INVE 124-07)*. Bogotá D.C.
- Ismail, N., Petersen, R., Masia, M. e Ingham, J. (2011). Diagonal shear behavior of unreinforced masonry wallets strengthened using twisted steel bars. *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063
- Oficina de Planeación Municipal, Ocaña (2012). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial municipio de Ocaña 2002-2011*. Ocaña, Colombia.

