

# OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE ARCILLA USANDO EL ENSAYO DEL BRASIL

<sup>1,2</sup>V. J. García, <sup>2</sup>J. G. Pérez, <sup>2</sup>A. R. Zúñiga, <sup>1,3</sup>C. O. Márquez, <sup>2,4</sup>F. Fernández, <sup>2,4</sup>F. Hernández.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

<sup>2</sup>Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

<sup>3</sup>Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

<sup>4</sup>Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

e-mail: [vgarcia@unach.edu.ec](mailto:vgarcia@unach.edu.ec) – [vgarcia375@gmail.com](mailto:vgarcia375@gmail.com)

## R esumen

El objetivo de este trabajo fue mejorar la calidad de ladrillos de arcilla producidos artesanalmente en la región al sur del Ecuador, con la finalidad de habilitarlo para un uso extendido en la industria local de la construcción, y formular un proceso de fabricación más amigable al medioambiente, que reduzca el impacto ambiental que la producción del ladrillo artesanal acarrea con la explotación intensiva de recursos no renovables. Para lograr nuestro objetivo, formulamos un novedoso factor de optimización basado en el ensayo del Brasil, se buscó la proporción óptima entre la cantidad de material “arcilloso” – material “arenoso” (mezcla óptima, MO). Se prepararon ladrillos de arcilla con la MO, se sinterizaron a 950 °C y se caracterizaron. Adicionalmente, se caracterizaron ladrillos elaborados por productores artesanales de la región y los resultados se cotejaron con los obtenidos en ladrillos preparados con la MO. Nuestros datos revelan que la mezcla óptima es 50 % de material “arcilloso” y 50 % de material “arenoso” y que con esta mezcla se logra una mejora del 300 % en la calidad del ladrillo artesanal. Esta mejora, probablemente se deba al enriquecimiento de la mezcla con un elemento que evoluciona con la temperatura y que contribuye a la conformación de una matriz más fuerte. Proceso que puede verse favorecido cuando se usa materiales “arenoso” con altos contenidos de andesita, la cual, es común en suelos Ecuatorianos.

**Palabras Claves:** Ladrillos de arcilla, Ensayo del Brasil, Optimización de mezclas

## A bstract

The purpose of this work was to improve the quality of handmade clay bricks from the southern region of Ecuador to make them suitable for more widespread use in the local construction industry and to develop a more environmentally friendly manufacturing process to reduce the environmental impact of the production of handmade bricks resulting from the intensive exploitation of non-renewable resources. To achieve our goal, we formulate a new factor of optimization based on the Brazilian Test and sought the optimal proportion between the amounts of “clayey” and “sandy” material (optimal mixture, OM). Clay bricks were prepared using the OM, sintered at 950 °C, and characterized. In addition, bricks produced by regional artisans were characterized, and the results were compared with the results obtained for the bricks prepared using the OM. Our data reveal that the optimal mixture is 50 % “clayey” material and 50 % “sandy” material and that with this mixture, an average improvement in brick quality of 300 % can be achieved. This improvement is probably due to the enrichment of the mixture with an element that evolves with the temperature and that contributes to the formation of a strong matrix. Conditions are favorable for this enrichment process to occur when “sandy” materials with high contents of andesite, which is common in Ecuadorian soils, are used.

**KeyWords:** Clay bricks, Brazilian test, Mixture optimization

## INTRODUCCIÓN

El ladrillo de arcilla macizo es uno de los materiales de construcción más antiguos usados por la humanidad. Este es elaborado mediante un proceso de manufactura simple (mezclado, amasado, secado y horneado), es un producto económico, que se fabrica con recursos no renovables como la arcilla, que existen en abundancia en diversas regiones del planeta.

El ladrillo de arcilla ofrece solidez, durabilidad y compacidad, entre otras propiedades físicas, mecánicas y térmicas que puede exhibir. Sin embargo, la tecnología del ladrillo de arcilla ha evolucionado muy poco y la mejora de su desempeño tecnológico ha recibido poca atención. Por ejemplo, el ladrillo de arcilla es muy pesado (entre 3 y 5 kg) para ser usado en muchas de sus principales aplicaciones, como unidades individuales de mampostería en edificaciones altas. Por otro lado, con el gran avance tecnológico del concreto en las últimas tres décadas, el ladrillo de arcilla ha perdido mercado y tiene en el bloque de concreto uno de sus principales competidores. Aun así, el ladrillo de arcilla continúa ofreciendo propiedades interesantes: alta resistencia ante agentes climáticos como humedad, sales solubles, bajas temperaturas y tolerancia a grandes cambios en temperatura, lo que hace que tenga gran durabilidad (aunque no exista un ensayo para la cuantificación y/o estimación de la durabilidad). También, el ladrillo de arcilla ofrece: buen aislamiento acústico entre 43 y 49 dB, alta resistencia al fuego entre 30 y 240 minutos antes de colapsar, alta capacidad térmica que resulta de su habilidad de almacenar grandes cantidades de energía ( $J/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), un valor alto de transmitancia térmica ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) que lo hace atractivo para lograr un buen uso de la energía en las edificaciones, entre otras (1).

Sin embargo, dado su bajo costo de pro-

ducción y el amplio espectro de propiedades que exhibe, el ladrillo de arcilla tiene un gran potencial de desarrollo tecnológico, a pesar que, se tiene “poco” conocimiento fundamental de la relación entre composición, microestructura y desempeño mecánico (1).

Es por esto que existe un gran interés en desarrollar tecnológicamente un nuevo ladrillo de arcilla que posea un desempeño mejorado para así dar respuesta a los desafíos tecnológicos que plantea la moderna industria de la construcción. No obstante, la producción de ladrillos de arcilla tiene un alto impacto ambiental. Este impacto se puede resumir en un gran: consumo de recursos no renovables (materiales), consumo de energía, consumo de agua, emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero y generación de desechos, entre otros (2–4). Los materiales que se usan en la industria de los ladrillos de arcilla se encuentran dispersos en la superficie de la tierra y se han originado de manera natural en procesos geológicos complejos que han ocurrido durante la formación de la corteza terrestre. La posibilidad de usar estos materiales en la manufactura de ladrillos de arcilla depende primariamente de las condiciones geológicas y geoquímicas en la que se formó el material, así como, de su composición mineralógica. El impacto ambiental debido al consumo de recursos no renovables está relacionado con la disponibilidad de estos materiales arcillosos y con la explotación de áreas que deben estar disponibles para la conservación de la biodiversidad. Así, la explotación intensiva de yacimientos de arcilla es una amenaza a la sostenibilidad ambiental y perjudica el desarrollo de una industria de la construcción sostenible. De hecho, en China, la escasez de arcilla ha hecho que se limite el uso de ladrillos de arcilla (3). En Brasil, con reservas estimadas de 3,7 billones de toneladas y un consumo anual de 180 millones de toneladas, se estima, que las reservas pueden durar aproximadamente unos 20 años. Desde el punto de vista ambiental, este tiempo es corto, pero también una razón de preocupación por la degradación del suelo asociada a la actividad de minería de la arcilla. De hecho, efectos adversos como el daño al paisaje y la eliminación de desechos está penado por la ley (2). Una tendencia que trata de mitigar estos efectos desfavorables, consiste en incorporar en el ladrillo, desechos generados por otras industrias, de manera que, exista una explotación menos intensiva del yacimiento, que se prolongue su vida útil y al mismo tiempo reduzca el uso de vertederos de desechos (2,3,5).

La mitigación de los efectos ambientales que tiene la producción de ladrillos de arcilla, así como, el desarrollo tecnológico de un ladrillo de arcilla optimizado, co-

mienza por la formulación de una mezcla óptima (MO) considerando la composición del material “arcilloso”, así como, del material “arenoso” disponible. En la MO, el componente dominante es el cuarzo, pero los ingredientes más importantes son los silicatos hidratados o minerales arcillosos, que aportan viscosidad y plasticidad a la mezcla cuando está hidratada. Otros ingredientes, incluyen: carbonatos, óxidos de hierro y otros minerales y sus mezclas, que se usan entre otras cosas como fluidificantes o desengrasantes. La composición mineralógica de los minerales arcillosos es muy variable. La cantidad y composición de estos minerales influye directamente sobre el moldeado y el secado del ladrillo antes de llevarlo al horno, así como también, el comportamiento durante la cocción, la calidad y el color del producto terminado.

El ladrillo de arcilla producido artesanalmente es un material de construcción importante en muchos países de sur américa. Existen regiones donde hay un gran número familias que tienen como actividad principal la producción artesanal de ladrillos de arcilla. En general estos productores poseen conocimientos que han heredado de ascendientes familiares y fabrican ladrillos de arcilla con 90 % de material “arcilloso” y 10 % de material “arenoso”. Sin embargo, la proporción material “arcilloso” – material “arenoso” más adecuada depende en buena medida de la naturaleza de los materiales disponibles. Además, debemos tener en cuenta que los requerimientos para preservar el ambiente crecen constantemente (2), así que la optimización de la proporción de material “arcilloso” – material “arenoso” más adecuada constituye un modo efectivo e importante para mitigar el impacto ambiental (6).

El objetivo de este trabajo fue mejorar la calidad de ladrillos de arcilla producidos artesanalmente en la región al sur del Ecuador, con la finalidad de habilitarlo para un uso extendido en la industria local de la construcción y poder formular un proceso de fabricación más amigable al ambiente, que sirva para reducir el impacto ambiental que su producción acarrea debido a la explotación intensiva de recursos no renovable.

Para lograr nuestro objetivo desarrollamos un método de optimización de la mezcla basado en el ensayo del Brasil y la resistencia a la tracción indirecta por unida de masa. Así, se encontró la proporción óptima entre los ingredientes de la mezcla. Luego se caracterizaron ladrillos de arcilla elaborados por los siete mayores productores artesanales de la región (con producción mayor a 10000 unidades) y los resultados fueron comparados con los

obtenidos de la caracterización de los ladrillos preparados con la MO.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de métodos y normas usadas

#### 1. Caracterización de la materia prima (material “arcilloso” – material “arenoso”).

a. El análisis granulométrico se realizó encontrando la distribución del tamaño de las partículas, la cual se determinó usando los tamices número 20, 40, 60, 100 y 200 (7).

b. Determinación de las propiedades geotécnicas de las pastas preparadas. El límite plástico (PL) fue determinado usando el método de la zanja de 3 mm y el límite líquido (LL) fue determinado usando el aparato de Casagranden (8). El índice de plasticidad (IP) fue calculado basado en la diferencia aritmética entre LL y PL. Para la preparación de ladrillos, la mezcla fue humedecida 5 puntos por encima de su límite líquido.

c. Determinación de la porosidad, densidad, cantidad de agua absorbida, variación dimensional.

Contracción (CS) de las muestras después de haberse secado en la estufa se determinó usando la ecuación (1):

$$CS\% = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100\% \quad \text{ecuación 1}$$

En la ecuación (1),  $L_1$  representa la longitud del espécimen seco al ambiente y antes de ingresar a la estufa.

La contracción (CC) de las muestras después de su cocción en el horno se determinó usando la ecuación (2) :

$$CC\% = \frac{L_2 - L_3}{L_2} \times 100\% \quad \text{ecuación 2}$$

En la ecuación (2):  $L_2$  representa la longitud del espécimen después de haberse secado en la estufa y la longitud antes de ingresar al horno de cocción.  $L_3$ , representa la longitud del espécimen después de su cocción en el horno.

La contracción total (CT) es:

$$CT = CC + CS$$

La densidad y la porosidad se determinan usando el método gravimétrico basado en el principio de Arquímedes. Los especímenes saturados de agua durante 24h, se pesaron estando inmersos en agua ( $W1$ ) y luego de secar el agua superficial, se pesaron en aire ( $W2$ ). Posteriormente, las muestras se secaron durante 6h en estufa a una temperatura de 105 °C, para así, eliminar completamente el agua y pesar los especímenes secos ( $W3$ ).

La cantidad relativa de agua absorbida ( $WA$ ) se determinó usando la ecuación (4) y siguiendo la norma ASTM (9). La  $WA$  corresponde con la cantidad relativa (en peso) de agua absorbida por el espécimen, durante la inmersión en las condiciones prescritas en relación con el peso del espécimen seco:

$$WA(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3} \times 100 \%$$

La fracción de poros abiertos ( $f_o$ ) o porosidad aparente (10), fue calculada usando la ecuación (5):

$$f_o = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\%$$

La densidad de la fase sólida ( $\rho_s$ ) y la densidad aparente ( $\rho_b$ ) se calculan usando las relaciones en la ecuación (6), ver referencia (11):

$$\rho_s = \frac{W_3}{W_3 - W_1} \times \rho_A \quad ; \quad \rho_b = \frac{W_3}{W_2 - W_1} \times \rho_A$$

En la ecuación (6),  $\rho_A = 997,04 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del agua a 25 °C.

El porcentaje de masa perdida durante la cocción y sinterizado fue estimado usando la ecuación:

$$LOS = \frac{W_4 - W_3}{W_3} \times 100\%$$

En la ecuación (7),  $W_4$  representa el peso del espécimen seco antes de ingresar al horno para su cocción y sinterizado.

d. Se realizó el ensayo de tracción indirecta (Ensayo del Brasil) en los discos cocidos y sinterizados a diferentes temperaturas. En este ensayo, el disco es comprimido verticalmente de mane-

ra que se genera indirectamente un esfuerzo tensor en la dirección horizontal. Se registra el valor máximo de la carga aplicada ( $P_{m\acute{a}x}$ ) cuando se produce la falla del disco y la resistencia a la tracción indirecta ( $\sigma_{TI}$ ) se calcula usando la ecuación (8):

$$\sigma_{TI} = \frac{2P_{m\acute{a}x}}{\pi D l}$$

En la ecuación (8),  $D$  representa el diámetro del disco y  $l$  su grosor. El ensayo de tracción indirecta ofrece algunas ventajas sobre otros métodos, la configuración del ensayo es simple y en él se usan especímenes en forma de disco o de cilindro. Con este método se ensaya un gran volumen de la muestra y no es sensible a defectos en la superficie (12).

e. La resistencia en compresión de los ladrillos se determinó siguiendo la norma ASTM (9) y realizando el ensayo por quintuplicado. Para este ensayo usamos una maquina universal (Versa Tester de Soil Test INC. USA) y la resistencia a la compresión se determinó dividiendo la máxima carga aplicada entre el área de la cara del ladrillo que se encuentra sujeta a la carga.

f. En el secado de ladrillos y discos, las muestras se dejaron en el molde durante 12 h y permanecieron secando en condiciones ambientales 72 h. Luego, se secaron en estufa a 105 °C durante 24 h. Las muestras fueron llevadas desde temperatura ambiente a 60 °C con una velocidad de calentamiento de 0.08 °C/min (~ 8 h), donde permaneció 3h, posteriormente se subió la temperatura hasta 105 °C a la misma velocidad de calentamiento, donde permaneció durante 4 h. Se desconectó la estufa y las muestras se dejaron enfriar dentro de la misma hasta alcanzar la temperatura ambiente.

g. Para la cocción y sinterizado de ladrillos y discos, los discos fueron cocidos y sinterizados a 500 °C, 700 °C y 950 °C, mientras que los ladrillos fueron cocidos solo a 950 °C. La cocción y sinterizado, se realizó en un horno eléctrico, con una velocidad de calentamiento de 1.66 °C/min hasta alcanzar la temperatura final donde permaneció durante 3 h. Finalmente, las muestras se dejaron enfriar libremente por convección natural hasta alcanzar la temperatura ambiente.

## 2. Diseño experimental

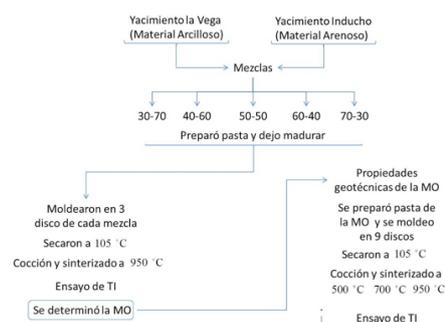
La materia prima, material "arcilloso" y material "arenoso" usada para producir ladrillos artesanales se obtuvo de los yacimientos naturales La Vega (LVG) e Indiucho (IND), respectivamente. Los dos yacimientos se encuentran situados en el cantón Catamayo, provincia de Loja en Ecuador. El yacimiento LVG se encuentra ubicado en

latitud sur: 4°00'39,7'' y longitud oeste: 79°22'43,51'', con una estructura geomorfológica de la formación Gonzanamá. El yacimiento IND se encuentra ubicado en latitud sur: 4°01'47,4' y longitud oeste: 79°21'54,5'', entre la formación Sacapalca y Loma Blanca. La Formación Gonzanamá es del Paleoceno y descansa discordante sobre la formación Sacapalca, consiste básicamente de rocas de origen vulcano sedimentario como arcillas de color café oscuro, lutitas de color gris, areniscas tobáceas y tobas. Se cree que esta formación tiene un espesor de aproximadamente 1000 metros. La formación Sacapalca es del Paleógeno, con una litología que corresponde a lavas andesíticas, rocas de tipo piroclástico. Las lavas se presentan resistentes a la erosión y se ubican en las partes más altas de la cuenca Catamayo, mientras que las rocas de tipo piroclástico corresponden a tobas andesíticas, tobas aglomeráticas y aglomerados subordinados. Las lavas son pórfidos andesíticos de color café o gris, con un gran contenido de minerales máficos observándose en algunos casos enstatita, hornblenda y augita. La formación Loma Blanca es del Oligogeno-Mioceno y descansa discordantemente sobre la formación Gonzanamá, básicamente contempla la parte basal en un aglomerado, y luego por una secuencia de tobas blancas de grano medio con estratificación, cuyas capas tienen un ángulo de inclinación de aproximadamente 124 grados, en dirección SE. Las rocas de esta formación están envueltas en una matriz limosa, los clastos, principalmente tobas abigarradas que conservan tamaños que van desde milímetros a centímetros. La formación esta sobrepuesta por una secuencia de tobas aglomeráticas, tobas y flujos piroclásticos, cuyo ambiente de depósito es de tipo continental (13,14).

Las muestras fueron pasadas por el tamiz #18 para remover componentes inertes del material y así, obtener granos menores de 1mm. No se utilizó ningún tratamiento especial como los señalados por Kornilov y Luzim (2004) (15) para la activación de las arcillas.

La optimización de la mezcla y su caracterización se realizó siguiendo el procedimiento delineado en la Figura 1. Para encontrar la MO se utilizó el método simplex-reticular y se prepararon mezclas con las siguientes formulaciones de Materia arcilloso/material arenoso, expresadas en porcentaje en peso total de la mezcla: 30/70, 40/60, 50/50, 60/40 y 70/30. Los materiales fueron cuidadosamente aireados y mezclados manualmente. Se agregó agua a la mezcla hasta conseguir una consistencia uniforme. Luego, las pastas se dejaron reposar por 24 horas en bolsa herméticas (proceso de maduración) y así poder lograr la máxima plasticidad posible. Posteriormente, porciones de cada pasta fueron colocados en moldes

circulares con un diámetro de ~75 mm y un grosor de ~20 mm para obtener muestras discoidales. Se prepararon tres réplicas de cada formulación dando un total de quince muestras. Sobre cada muestra en el molde, se colocó durante sesenta minutos un peso ~500 g para lograr una extrusión suave. Posteriormente, las quince muestras fueron secadas a 105 °C y cocidas a 950 °C.



**Figura 1. Metodología implementada para encontrar la mezcla óptima (MO), así como en su caracterización. Ensayo de tracción indirecta (TI)..**

Los discos fueron sometidos al ensayo de tracción indirecta (TI) con una velocidad de carga de 0,010 mm/min. Para seleccionar la MO definimos el factor de optimización ( $f_{opt}$ ), de manera similar al factor de eficiencia estructural definido por del Coz-Díaz *et al.* (2011) (16). Por consiguiente, el factor de optimización lo determinamos como el cociente que resulta de dividir el máximo esfuerzo que soporta la muestra en tracción indirecta ( $\sigma_{TI}$ ) expresado en MPa, entre el peso de la muestra ( $p$ ) expresado en kg. Así,

$$f_{opt} \equiv \frac{\sigma_{TI}}{p}$$

$$f_{opt} \equiv \frac{2}{\pi D l} \times \frac{P_{m\acute{a}x}}{p}$$

La MO es la del disco que exhibe el valor numérico más alto del factor de optimización. Una vez identificada la MO se procedió a preparar pasta con esa formulación. Se determinaron las propiedades geotécnicas de la pasta y con ella se prepararon nueve muestras discoidales siguiendo el procedimiento previamente

descrito. Una vez, secadas las muestras, el grupo fue dividido en tres subgrupos de tres. Un grupo fue cocido y sinterizado hasta una temperatura de 500°C, un segundo fue horneado a una temperatura de 700°C y el tercer grupo se coció y sinterizó a 950°C. Los discos cocidos y sinterizados fueron sometidos al ensayo de tracción indirecta.

Se prepararon ladrillos con pasta de la MO y se caracterizaron. De igual manera, se caracterizaron ladrillos artesanales producidos por los siete productores más importantes de la región.

Posteriormente se preparó pasta en cantidad suficiente para fabricar cinco ladrillos, hidratando la MO cinco puntos por arriba de su límite líquido. La pasta se dejó reposar con ella se rellenaron moldes de madera de 270x140x80 mm. Sobre cada molde se colocó, durante sesenta minutos, un peso ~ 3 kg para lograr un moldeado o extrusión suave. Los ladrillos se dejaron secar siguiendo el protocolo expresado previamente en el punto (1f). Posteriormente, los ladrillos fueron cocidos y sinterizados siguiendo lo expresado en (1h). Luego, siguiendo el protocolo en (1c), se procedió a la caracterización convencional (variación dimensional, adsorción de agua, densidad y porosidad) de los ladrillos fabricados en el laboratorio y de los fabricados por los artesanos de la región. Consecutivamente, los ladrillos fueron sometidos al ensayo de compresión directa en concordancia con la metodología definida en el punto (1e).

Los resultados obtenidos de los ensayos con los ladrillos fabricados en el laboratorio se cotejaron con los obtenidos de los ensayos realizados con los ladrillos artesanales de productores de la región.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del ensayo de tracción indirecta (TI) en especímenes con diferentes proporciones de material de IND y LVG cocidos a 950 °C, se muestran

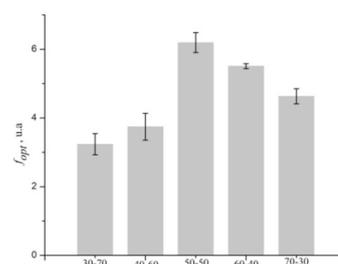
en la Tabla 1. En la presencia de un esfuerzo tensor, los discos de las diferentes mezclas realizadas se comportan de manera similar a los materiales casi-fragiles como el concreto y las rocas. La resistencia a tensión es muy baja cuando se compara con la resistencia a compresión y con frecuencia se ignora. La resistencia en tensión depende principalmente de la resistencia de los granos minerales y de la matriz que los mantiene juntos. Adicionalmente, existe una dependencia de la composición química, inclusiones y de la cantidad y dimensiones de los poros. Debido a que la resistencia depende fuertemente de las zonas más debiles, la materia prima de material arcilloso homogéneo con pocas impurezas aporta alta resistencia en tensión (17).

**Tabla 1. Resultados de los ensayos realizados con el propósito de optimizar las proporciones de material de LVG e IND en la mezcla y en especímenes sinterizados a 950 °C.**

LVG (%)	IND (%)	<i>p</i> (g)	<i>D</i> (cm)	<i>l</i> (cm)	<i>P</i> <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_{TI}$ (MPa)	<i>f</i> <sub>opt</sub> (MPa/kg)	LOS (%)	CS (%)	CC (%)
30	70	118,81	6,94	1,70	0,56	0,40	3,24	5,27	0,30	10,71
40	60	147,95	6,85	2,24	1,33	0,55	3,75	5,75	0,29	2,36
50	50	117,29	6,79	1,84	1,42	0,73	6,20	6,33	0,24	1,52
60	40	137,66	6,71	2,21	1,55	0,67	4,90	6,90	0,43	2,98
70	30	139,64	6,66	2,28	1,68	0,71	5,12	7,61	0,49	4,63

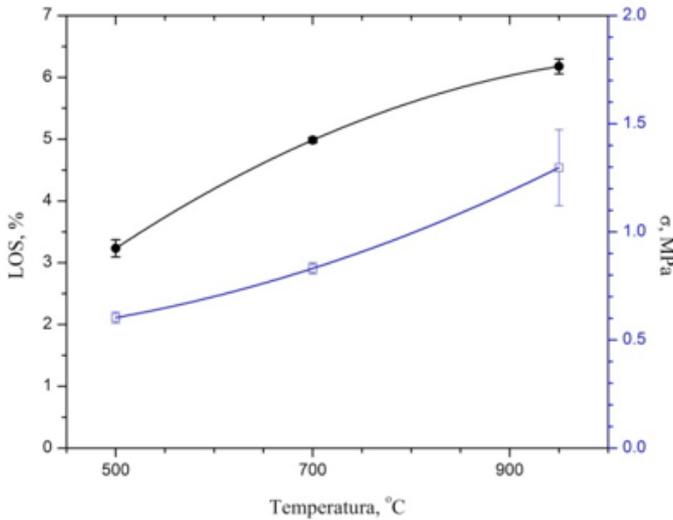
\**p*, *D* y *l* representan el peso del disco antes del ensayo del Brasil, el diámetro del disco y su grosor, respectivamente. *P*<sub>max</sub> representa el máximo valor de la carga aplicada antes del colapso del disco. LOS, CS y CC representan la pérdida de peso durante la cocción, la contracción durante el secado y la contracción durante la cocción, respectivamente. *f*<sub>opt</sub> es el valor del factor de optimización (resistencia a la tracción indirecta por unidad de masa).  $\sigma_{TI}$  representa la resistencia a la tracción indirecta.

En la Figura 2, se ha representado el valor del factor de optimización definido en la ecuación (10) para cada una de las mezclas ensayadas. Como se puede observar, la mezcla con una relación de 50/50 exhibe el valor más alto del factor de optimización (6,20 MPa/kg), así como el valor más bajo de variación dimensional una vez que se ha secado (0,24 %) y después de haberse cocido o sinterizado (1,52 %). De aquí en adelante, definiremos a la mezcla óptima (MO) como la mezcla con 50 % de material de LVG y 50 % de material de IND, o lo que es lo mismo, con proporciones de 50/50.



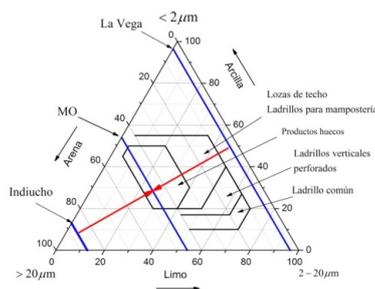
**Figura 2. Valor del factor de optimización definido en la ecuación (10) versus las diferentes mezclas ensayadas.**

En la Figura 3, se muestra la variación de la resistencia a la tracción indirecta y las pérdidas por ignición de la MO con la temperatura final de sinterizado.



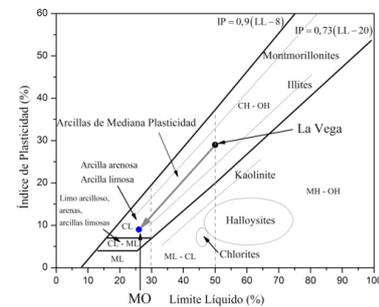
**Figura 3.** Variación de la resistencia a la tracción indirecta ( $\sigma$ ) de la Mezcla Óptima (MO) con la temperatura final de sinterizado. También, se muestra la variación de las pérdidas por ignición (LOS) con la temperatura final de sinterizado.

En la Figura 4 se muestra la granulometría media de LVG e IND, así como de la MO. También, se presenta una prognosis del potencial uso de la MO en la fabricación de productos de arcilla. La muestra de IND exhibe un 8,63% de grava, 79,65% de arena y 11,71% de limo más arcilla. Mientras que la muestra de LVG despliega un 0% de grava, 3,55% de arena y 96,45% de limo más arcilla. La MO mostró poseer 0% de grava, 45,92% de arena y 54,08% de limo más arcilla. Con esta granulometría y en concordancia con la predicción que permite realizar el diagrama de dominios granulométricos, la MO posee un uso potencial en la fabricación de materiales de arcilla para la construcción en la forma de productos huecos.



**Figura 4** Granulometría de las muestras de LVG, Indiuchio y MO. Los segmentos que van del extremo de las arenas al de los limos corresponden con la suma de la fracción de limo y arcilla. Los segmentos con flechas señalan la granulometría de la MO. Los espacios delimitados dentro del diagrama señalan dominios granulométricos y su correspondiente prognosis de uso.

La caracterización de las propiedades geotécnicas de la MO revela que la MO presenta un comportamiento en correspondencia con una arcilla de baja plasticidad similar a una arcilla arenosa o limosa (IP=7%; LL=27% y LP=20%). Mientras que, la muestra de LVG exhibe un comportamiento que se encuentra en la frontera de media a alta plasticidad (IP=27%; LL=50% y LP=17%), ver Figura 5. En la Figura 5, se muestran las diferencias entre las propiedades geotécnicas del material de la LVG y de la MO.



**Figura 5.** Propiedades geotécnicas del material de LVG y de la MO. Las dos letras usadas para expresar el subgrupo, se derivan de la combinación de las siguientes letras: arcilla (C), limo (M), orgánico (O), alta plasticidad (H), baja plasticidad (L).

En la Figura 6, se muestra el diagrama de trabajabilidad (18), en esta figura se ilustra la prognosis del moldeado y/o extrusión del material de LVG y de la MO, usando los límites de Atterberg. En este diagrama, se puede observar que la muestra de LVG posee unas propiedades plásticas aceptables para su moldeado, mientras que las propiedades plásticas de la MO la ubican en las vecindades a la frontera, entre moldeado aceptable y muy plástico, con baja cohesión. En la MO la adición de material "arenoso" hasta el 50% hace que aumente el contenido de arena fina, hay mayor contenido de material desengrasante y por tanto menor plasticidad.

En la Tabla 2, se presentan los resultados de la caracterización de ladrillos producidos por siete productores artesanales de la región y los fabricados en el laboratorio usando la MO. En general, los

ladrillos de arcilla exhiben un conjunto de propiedades que son importantes en la evaluación de su resistencia y durabilidad. Estas propiedades están relacionadas con la calidad de la materia prima y directamente asociadas con las condiciones de manufactura.

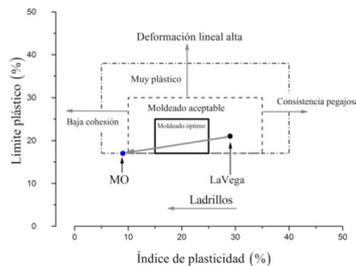


Figura 6. Prognosis del moldeo y/o extrusión usando los límites de Atterberg.

La cocción y sinterizado del ladrillo de arcilla produce una serie de cambios mineralógicos, texturales y físicos que dependen de muchos factores que tienen influencia en la porosidad. La porosidad puede ser definida como el cociente entre el volumen del espacio vacío (poros y fisuras) y el volumen total del espécimen. La porosidad es un parámetro importante de los ladrillos de arcilla debido a la influencia que tiene en propiedades como reactividad química, resistencia mecánica, durabilidad y calidad general del ladrillo. Las dimensiones y distribución de los poros está influenciada por la calidad de la materia prima, la presencia de aditivos o impurezas, la cantidad de agua y la temperatura máxima de sinterizado. El volumen total relativo de poros que se encuentra en contacto con la atmósfera de manera directa o a través de otros poros (ver ecuación (5)) se expresa como la fracción de poros abiertos ( $f_p$ ) o porosidad aparente. Los ladrillos artesanales mostraron una porosidad aparente entre el 25 y 34%, mientras que, el ladrillo elaborado en el laboratorio un valor de tan solo del 11,84%.

La densidad aparente describe la relación entre el peso del ladrillo seco y el volumen ocupado por el ladrillo de arcilla, midiendo la proporción de materia que se encuentra en el volumen. Es

evidente, por esta descripción, que cuanto más alto sea su valor, más denso es el ladrillo y obviamente mejor son sus propiedades mecánicas y durabilidad. Los valores típicos para la densidad aparente ( $\rho_b$ ) son de 1.20 a 1.90 g/cm<sup>3</sup>. La densidad aparente en ladrillos artesanales varió entre 1.42 a 1.53 g/cm<sup>3</sup> y para el ladrillo elaborado en el laboratorio fue de 1.85 g/cm<sup>3</sup>. La densidad de la fase sólida ( $\rho_s$ ) en los ladrillos artesanales varió entre 2.02 a 2.27 g/cm<sup>3</sup> mientras que, para el ladrillo fabricado en el laboratorio fue 2.37 g/cm<sup>3</sup>.

Los poros constituyen una gran parte del volumen del ladrillo y cuando el ladrillo es expuesto a la lluvia o al lavado, el agua penetra en los poros. La absorción de agua determina la capacidad de almacenaje del fluido y su capacidad para circular dentro del ladrillo, favoreciéndose en este último caso, el deterioro y la reducción de la resistencia mecánica. Cuando la temperatura baja de cero grados, el agua en los poros se congela y conduce a la delaminación, desintegración o “cracking”. En presencia de sales solubles, el agua tiende a reaccionar con el ladrillo produciendo eflorescencia. El incremento del volumen producido por la cristalización de sales puede causar daños severos (19.20). En la Tabla 2, se puede observar que la absorción de agua ( $WA$ ) en ladrillos artesanales varió entre 16.88 a 22.97 %, mientras que en el ladrillo fabricado en el laboratorio fue de tan solo del 11.84%. Sin embargo, la absorción de agua es un factor importante que afecta la durabilidad del ladrillo. Cuanto menos agua se infiltra en el ladrillo, este es más duradero y resistente a daños ambientales. Así, la estructura interna del ladrillo debe ser suficientemente compacta para evitar la intrusión de agua. La red de poros no depende solamente de la pérdida de masa durante la cocción y sinterizado, sino también, depende del acercamiento de las partículas durante el proceso de sinterizado, el cual produce una disminución en el tamaño de los poros. En general se recomienda que el coeficiente de absorción de agua se encuentre por debajo del 15 % (20.21).

La resistencia a compresión da una medida de la calidad de los ladrillos. Los resultados obtenidos representan el promedio del ensayo realizado en cinco muestras. Para los ladrillos artesanales se registraron valores que van de 3 a 5 MPa. Mientras que el valor promedio del ladrillo fabricado en el laboratorio fue de 13.5 MPa, lo que sugiere que el ladrillo fabricado en el laboratorio con la MO, posee una resistencia razonablemente alta en compresión, lográndose una mejora de aproximadamente el 300 % en la resistencia a la compresión. La resistencia en compresión está fuertemente influenciada por las características de la materia prima y por el proceso de producción.

**Tabla 2. Resultados de la caracterización de ladrillos producidos por siete productores y los fabricados en el laboratorio usando la MO.**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Lab
$W_1$ (g) saturado en agua	2187	2371	2105	2071	2230	2342	2416	3305
$W_2$ (g) saturado en aire	5068	5277	4975	4785	5070	5115	5305	6388
$W_3$ (g) Seco en estufa	4122	4459	4068	4094	4134	4243	4323	5712
$W_4$ (g) Verde	-	-	-	-	-	-	-	6091
$WA$ (%)	22,97	18,35	22,31	16,88	22,65	20,53	22,72	11,84
$f_o$ (%) poros abiertos	32,85	28,16	31,62	25,47	32,97	31,42	33,99	21,93
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,43	1,53	1,42	1,51	1,46	1,53	1,50	1,85
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,13	2,14	2,07	2,02	2,17	2,23	2,27	2,37
$LOS$ (%)	-	-	-	-	-	-	-	6,64
$\sigma_c$ (MPa)	5,53	4,78	3,21	6,23	4,22	3,02	5,23	13,89
Dv Std de $\sigma_c$ (MPa)	0,63	0,27	0,71	0,47	1,16	0,43	1,05	0,54
$f_{opt}$ (MPa/kg)	1,34	1,07	0,79	1,52	1,02	0,71	1,21	2,43

\*  $W_1$  : peso en agua del ladrillo saturado,  $W_2$  : peso en aire del ladrillo saturado,  $W_3$  : peso del ladrillo una vez que se ha secado en la estufa y  $W_4$  : peso del ladrillo verde.  $WA$ : cantidad relativa de agua adsorbida.  $f_o$  fracción de espacio ocupado por poros abiertos.  $\rho_b$  : densidad aparente y  $\rho_s$  : la densidad de la fase sólida.  $LOS$  es la etiqueta para las pérdidas relativas de masa después de la cocción y/o sinterizado.  $\sigma_c$  : resistencia en compresión. Dv Std de  $\sigma_c$  : desviación estándar de los valores de la resistencia en compresión.  $f_{opt}$  etiqueta para el factor de optimización

## CONCLUSIONES

La optimización de la proporción de material “arcilloso” y material “arenoso” ha conducido a una mejora substancial (300 %) en la calidad de ladrillos de arcilla producidos artesanalmente. Esta mejora habilita un uso extendido del ladrillo artesanal en la industria local de la construcción. La prescripción de una mezcla óptima hace el proceso de fabricación amigable al ambiente, ya que reduce el impacto ambiental que la producción de ladrillo artesanal acarrea debido a la explotación intensiva de recursos no renovable. Los resultados de este trabajo indican que es posible obtener ladrillos de arcilla con un 50% de material “arenoso” cumpliendo con los estándares tecnológicos exigidos a los ladrillos de arcilla tradicionales. El uso de mayores cantidades de material arenoso tiene

implicaciones prácticas en la preservación del ambiente y en los costos en la producción de ladrillos ya que se requiere menos material arcilloso.

El ensayo de tracción indirecta o ensayo del Brasil realizado en muestras con forma de disco y elaborados con diferentes mezclas de material “arcilloso” y material “arenoso” ha permitido de manera exitosa encontrara la mezcla óptima en términos del valor exhibido por el factor de optimización definido en la ecuación (10). Esto, se debe a que la resistencia en tensión depende principalmente de la resistencia de los granos minerales y de la matriz que los mantiene juntos. Adicionalmente, existe una dependencia de la composición química, inclusiones y de la cantidad y dimensiones de los poros. Así, el ensayo de tracción indirecta ha mostrado ser muy sensible a la fortaleza de la matriz del ladrillo. El siguiente paso natural de esta investigación es la mejora tecnológica del ladrillo, por esta razón, estudiamos el efecto los aditivos orgánicos como aserrín, tamo de arroz y bagazo de caña en la calidad del ladrillo elaborado con la mezcla óptima.

## AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento al Proyecto Prometeo de la Secretaria Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador y a la Universidad Técnica Particular de Loja por su patrocinio en el desarrollo de esta Investigación.

## R eferencias

1. Krakowiak K, Lourenço P, Ulm F. Multitechnique investigation of extruded clay brick microstructure. J Am Ceram Soc. 2001; 94(9):3012-22.
2. Monteiro SN, Vieira CMF. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. Constr Build Mater. Elsevier Ltd. 2014; 68:599-610.

3. Zhang L. Production of bricks from waste materials - A review. *Constr Build Mater.* Elsevier Ltd. 2013; 47:643-55.
4. Mukherjee S, Ghosh B. *The Science of Clays: Applications in Industry, Engineering and Environment.* Springer Netherlands. 2013
5. Muñoz Velasco P, Morales Ortíz MP, Mendivil Giró M a., Muñoz Velasco L. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material - A review. *Constr Build Mater.* 2014; 63:97-107.
6. Arsenović M, Pezo L, Stanković S, Radojević Z. Factor space differentiation of brick clays according to mineral content : Prediction of final brick product quality. *Appl Clay Sci.* 2015; 115:108-14.
7. ASTM D422-63(2007)e2. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM Inter. West Conshohocken, PA; 2007.
8. ASTM D4318-10e1. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM Inter. West Conshohocken, PA; 2010.
9. ASTM C67-14. Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. ASTM Inter. West Conshohocken, PA; 2014.
10. Velasco PM, Pilar M, Ortiz M, Antonio M, Giró M, Melia DM, et al. Applied clay science development of sustainable fired clay bricks by adding kindling from vine shoot : Study of thermal and mechanical properties. 2015;107:156-64.
11. Hall C, Hamilton A. Porosity–density relations in stone and brick materials. *Mater Struct.* 2013; 48(5):1265-71.
12. Hangl M, Borger A, Danzer R, Luxner HM. Application of the Brazilian disc test for strength measurements on ceramic green bodies. *Fract Mech Ceram.* 2002; 13:159-67.
13. Hungerbühler D, Steinmann M, Winkler W, Seward D, Egüez A, Peterson DE, et al. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Rev.* 2002; 57(1-2): 75-124.
14. Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Catamayo - Unidad de Gobernabilidad y desarrollo Territorial. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2012-2022. 2012. p. 654.
15. Kornilov AV, Luzin VP. Effective methods of processing argillaceous materials for building ceramics. *Glas Ceram (English Transl Steklo i Keramika).* 2004; 61(1-2): 27-9.
16. del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Álvarez Rabanal FP, Lozano Martínez-Luengas A. Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method. *Eng Struct.* 2011; 33(1):1-9.
17. Fernandes FM, Laurenco PB, Castro F. Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties. En: Bostenaru D, editor. *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures.* Springer Netherlands; 2010. p. 29-48.
18. Bain JA, Highley DE. Proceedings of the VI International Clay Conference 1978, organized by the Clay Minerals Group, Mineralogical Society, London, under the auspices of Association Internationale pour l'Etude des Argiles. *Developments in Sedimentology.* Elsevier; 1979. 437-446 p.
19. Alonso-Santurde R, Coz A, Viguri JR, Andrés A. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. *Constr Build Mater.* 2012; 27(1):97-106.
20. Ajam L, Ben Ouezdou M, Felfoul HS, Mensi RE. Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks. *Constr Build Mater.* 2009; 23(10):3240-7.
21. Alviset L. *Matériaux de terre cuite.* Tech l'ingénieur. 1987;C905-1.