

Desarrollo de ladrillos mejorados (LM) y uso de nuevas tecnologías en la fabricación de ladrillos ecológicos (LE)

Zúñiga-Suárez, Alonso^{(1)(*)}, **Hernández-Olivares, Francisco**⁽²⁾, **Fernández-Martínez, Francisco**⁽²⁾, **Zúñiga, Berenice**⁽³⁾ **Sánchez, Luis**⁽³⁾ **Paladines, Juan**⁽³⁾

(*) Docente-Investigador, Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, arzunigax@utpl.edu.ec, +593999679789.

(2) Investigador Prometeo, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, Universidad Politécnica de Madrid, España.

(3) Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

Resumen El ladrillo es un material ampliamente utilizado en la construcción, sin embargo no ha recibido la atención necesaria para mejorar su desempeño. Ocasionando una falta de conocimiento en sus procesos de fabricación como: sobreexplotación de las minas de arcilla, desconocimiento en las dosificaciones de las mezclas y emisión de gases de efecto invernadero producto de la quema de leña.

Esta investigación pretende encontrar una mezcla adecuada para producir ladrillos mejorados (LM) mediante el análisis de sus propiedades mecánicas en comparación con ladrillos producidos artesanalmente (LPA). Además la utilización del proceso de geopolimerización para la elaboración de un ladrillo ecológico (LE) a temperaturas ligeramente elevadas lo que otorga un beneficio medioambiental significativo.

Para lograr los objetivos, primero se caracterizó muestras provenientes de minas mediante ensayos físicos, químicos y mineralógicos, posteriormente se determinó la mezcla óptima de los LM y LE evaluando el factor de optimización (FO) con la aplicación del ensayo de compresión diametral. Para esto se elaboraron discos con diferentes combinaciones de materiales y procesos. Una vez encontradas las mezclas óptimas se fabricaron ladrillos para medir la resistencia mecánica mediante el ensayo de compresión simple.

Los resultados indican que los LM aumentan su resistencia de 400% respecto a los ladrillos artesanales a la zona de estudio (LPR). Por otra parte usando residuos mineros como materia prima para la elaboración de LE, muestran que su resistencia sobrepasa los valores de la normativa con 150%.

Palabras Clave: Ladrillos de arcilla; Optimización de mezclas; Geopolimerización ; Activación alcalina1; Compresión simple.

1 Introducción

El ladrillo es el material más antiguo de construcción utilizado por la humanidad y usado en varias regiones del mundo (Bianucci 2009). Generalmente los ladrillos son fabricados a base de recursos no renovables (como la arcilla), elaborados a mano y de bajo costo de producción; este ofrece varias propiedades como la durabilidad, solidez, resistencia a cambios climáticos, temperatura, aislamiento acústico, alta resistencia al fuego y transmitancia térmica. (García, et al, 2016).

Todavía se tiene poco conocimiento acerca de la composición entre microestructura y desempeño mecánico. Algunos investigadores han buscado la manera de utilizar materias primas diferentes a la arcilla para la fabricación y producción de ladrillos con la finalidad de disminuir la sobreexplotación de minas de arcilla y contaminación del medio ambiente debido a que la materia prima requiere altas temperaturas para su cocción. (Chen, et al, 2011; Roy S et al 2007), Romero y Flores (2010) por ejemplo utilizaron residuos provenientes de la extracción de minerales para dar solución a la problemática medioambiental y también para darle un valor agregado de manera directa a este tipo de residuos

La región sur del Ecuador no se encuentra exento de esta problemática, que es evidente en la explotación intensiva de minas de arcillas. Por cuanto, este estudio pretende optimizar las mezclas de ladrillos producidos artesanalmente (LPA) para la fabricación de ladrillos mejorados (LM). Además se investiga la posibilidad de reutilizar residuos mineros para la elaboración de ladrillos ecológicos (LE), en base a sus características químicas.

Para la elaboración de los LM la sílice de la materia prima se transforma en cristobalita mediante procesos de sinterización a temperatura de 950 °C. En el caso de los LE se aplica el método de geopolimerización donde la solución alcalina disuelve los contenidos de sílice y alúmina formando un gel geopolimérico a temperatura inferior de 120 °C.

2 Materiales y Métodos

2.1 Localización de la zona de estudio

El estudio se realizó en el sur del Ecuador, para los LM se seleccionó las minas por disponibilidad y accesibilidad recogiendo muestras de cinco sectores: Ceibopamba (MCB), Cangahua (MCA), Chinguilamaca (MCH), Palanda (MPL) y arena fina del sector Chinguilamaca (MAF) situados en la parroquia de Malacatos perteneciente a la provincia de Loja.

La materia prima de los LE fue extraída de relave de mina (RM) producto del proceso por concentración gravimétrica, que no generan contaminación por metales pesados, seleccionando así la concesión Minera Pituca II COD 500648, parroquia Timbara de la provincia de Zamora Chinchipe.

2.2 Caracterización de la materia prima

2.2.1 Ensayos físicos

Para la clasificación de suelos se efectuó el análisis granulométrico aplicando la norma ASTM D422, (método del hidrómetro), la norma ASTM D4318 determina Límites de Atterberg: límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP).

2.2.2 Ensayos químicos

Mediante estos ensayos se obtuvo el contenido de carbonatos, materia orgánica, nivel potencial de hidrógeno (pH) y superficie específica. Para la composición química se utilizó el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX). El análisis termogravimétrico (TGA) se aplicó únicamente a las cinco muestras que se utilizaron en la elaboración de los LM.

Cada muestra se experimentó variaciones entre temperatura ambiente y 1000 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C/minuto. El análisis térmico muestra la curva de variación del peso en función de la temperatura (TGA, color verde), la primera derivada de la temperatura (DSC, color azul) que representa la velocidad de ganancia o pérdida de peso y la segunda derivada que es el flujo de calor (2D-DSC, color café).

2.2.3 Ensayos mineralógicos

Difracción de rayos X: Este método determina la mineralogía de las materias primas, no sólo a la posibilidad de identificar la especie del mineral, sino también para permitir el estudio de las características cristalográficas. Para el análisis de resultados se utilizó el software DIFFRAC.SUITE EVA de Bruker; para este se registró un paso de 0,02 grados y un tiempo de medida de 2 segundos en cada muestra.

2.2.4 Compresión diametral (Test Brasileño)

Este ensayo es un indicador de la mezcla óptima en las diferentes combinaciones de materiales permitiendo optimizar tiempo y recursos. Utiliza una celda de carga model LC 101-5K, en conjunto con la prensa denominada Versa Tester, a velocidad de carga de 0,2 mm/MIN.

El valor de la resistencia a la compresión del espécimen se calcula con:

$$\sigma_{CD} = \frac{2P_{m\acute{a}x}}{\pi De} \quad (1)$$

Donde “Pmax” representa la carga máxima que soporta la mezcla, “D” es el diámetro del disco ensayado y “e” es el espesor del disco.

Para optimizar las mezclas se aplicó un factor de optimización (FO) siguiendo los procedimientos descritos por Del Coz Díaz, et al (2001). Así definimos al FO como el cociente entre la máxima carga soportada en el ensayo de compresión diametral cuyas unidades son MPa, y el peso de la muestra P expresado en kg "Ec. 2".

$$FO = \frac{\sigma_{CD}}{P} \quad (2)$$

Las mezclas óptimas presentan el mayor valor del factor de optimización FO.

Este ensayo se aplicó en los discos que fueron elaborados mediante cocción con las diferentes mezclas de arcillas a 950°C (Fig. 1), así como los fabricados con combinaciones entre variables de proceso de geopolimerización y llevados a un secado inferior de 200 °C (Fig. 2).

3 Diseño Experimental

3.1 Ladrillos mejorados (LM)

Actualmente, los productores de ladrillos en la zona de estudio aplican conocimientos ancestrales obteniendo una combinación entre "material arcilloso" y "material arenoso" en proporciones de 90/10 respectivamente. Sin embargo, en búsqueda de una mejora de las mezclas, se utilizó el FO, para lo cual se realizaron seis tipos de combinaciones en diferentes porcentajes (Fig. 1)

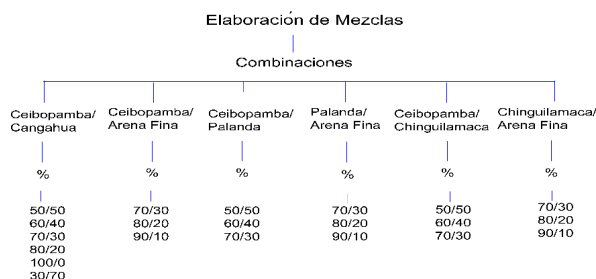


Fig. 1 Diseño de mezclas para ladrillos artesanales **Fuente:** Elaboración propia

Los materiales se mezclaron cuidadosamente de forma manual. Se dejó reposar cada mezcla por un lapso de 12 horas en bolsas cerradas herméticamente para conseguir un proceso de maduración y consecuentemente lograr la máxima plasticidad posible. Luego se colocaron porciones de cada mezcla en moldes con un diámetro de 75 mm y un espesor de 20 mm. Para cada mezcla se elaboraron tres réplicas, se colocó un peso de 4 kg durante 2 horas para compactación. Después los discos fueron secados hasta alcanzar los 105 °C y cocidos hasta los 950 °C.

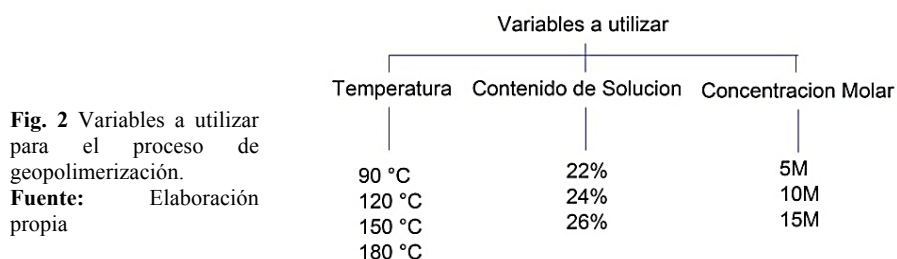
Mediante la utilización del FO se eligieron 6 mezclas y se elaboraron discos que fueron sinterizados a 500, 700, y 950 °C a fin de determinar temperatura de cocción óptima.

Finalmente con estas seis mezclas óptimas se fabricó los LM de dimensiones 28 x 14 x 9 cm los cuales se analizaron mediante el ensayo de compresión simple. Los resultados fueron comparados con la normativa ecuatoriana NTE INEN 297 y los LPA.

3.2 Ladrillos ecológicos (LE)

Para la determinación de la mezcla óptima en la fabricación de LE, se utilizó combinaciones de las diferentes variables que actúan en el proceso químico como: contenido de solución, temperatura de secado y presión de moldeado. Después se caracterizó la materia prima y se seleccionó el activador alcalino. El activador alcalino que brindó las mejores características físicas y mecánicas fue la solución de hidróxido de sodio. Por eso se utilizó este activador como precursor en el proceso de geopolimerización.

Para la elaboración de los discos se aplicaron combinaciones de solución alcalina en diferentes concentraciones de molaridad con la materia prima en diferentes porcentajes de contenido de solución (fig. 2). Los discos fueron ingresados en la estufa por 72 horas, para que actúe la solución alcalina sobre la materia prima. Después fueron secados a temperaturas de 90, 120, 150 y 180 °C; finalmente se aplicó el ensayo de compresión diametral para seleccionar la mezcla óptima mediante el FO.



4 Análisis de Resultados

4.1 Caracterización de la materia prima

Los resultados de los ensayos físicos indican presencia de suelos arcillosos en las Minas de Ceibopamba y Cangahua y suelos limos-arenosos en las Minas Chinguilamaca y Palanda. Los materiales de la mina de relave La Pituca II se clasificaron como suelos arenosos y/o limosos.

La composición química de los materiales de los LM y LE se aprecia en la Fig. 3, se observa que el mayor componente químico es el óxido de silicio seguido del óxido de aluminio, principales compuestos de los aluminosilicatos.

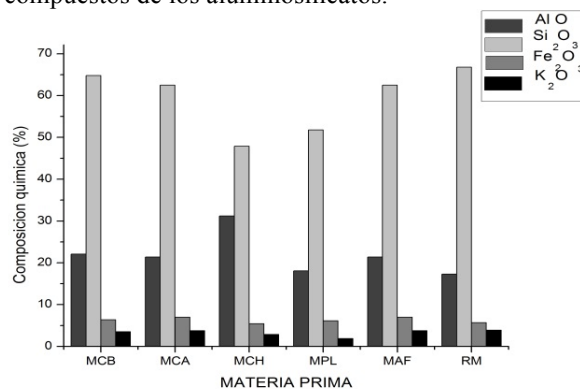


Fig. 3 Composición Química. FRX.
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1 se muestra la composición química de las materias primas utilizadas: potencial de Hidrógeno que indica la alcalinidad de las muestras, superficie específica que relaciona la existencia entre el área de las partículas y la masa.

El ensayo mineralógico DRX establece que las muestras para la elaboración de LM presentan como mineral predominante el cuarzo, que ayuda a mejorar la durabilidad y conservar la durabilidad y conservar la forma de los ladrillos luego del moldeado (Quillupangui, 2011), seguido de este mineral se halla la caolinita, que aporta características refractarias al ladrillo y eleva las propiedades mecánicas.

Los resultados de los componente para la elaboración de LE indican presencia de minerales como cuarzo bajo, ilita y clorita, por lo tanto los residuos de minería están formados por altas cantidades de sílice, que se ven corroborados en el ensayo de fluorescencia de rayos X.

En la Fig. 4 se presenta el difractograma para las muestras de relave de mina y Ceibopamba.

Tabla 1. Ensayos Químicos y Mineralógicos

Muestra	Ensayos Químicos		Ensayos Mineralógicos
	pH	Superficie específica m^2/g	DRX
Ceibopamba	7.7	6.1	Cuarzo, Caolinita, Hematita, Montmorillonita, Iilita
Cangahua	7.2	48.9	Cuarzo, Caolinita, Moscovita y Hematita.
Chinguilamaca	5.9	90.5	Cuarzo, Hematita, Montmorillonita, Iilita
Palanda	8.6	20.2	Cuarzo, Caolinita, Hematita, Iilita
Arena fina	7.2	39.8	Cuarzo, Caolinita Moscovita, Iilita
Relave de mina	8.6	10.4	Cuarzo bajo, Iilita, Clorita, Hematita, Oligoclasa

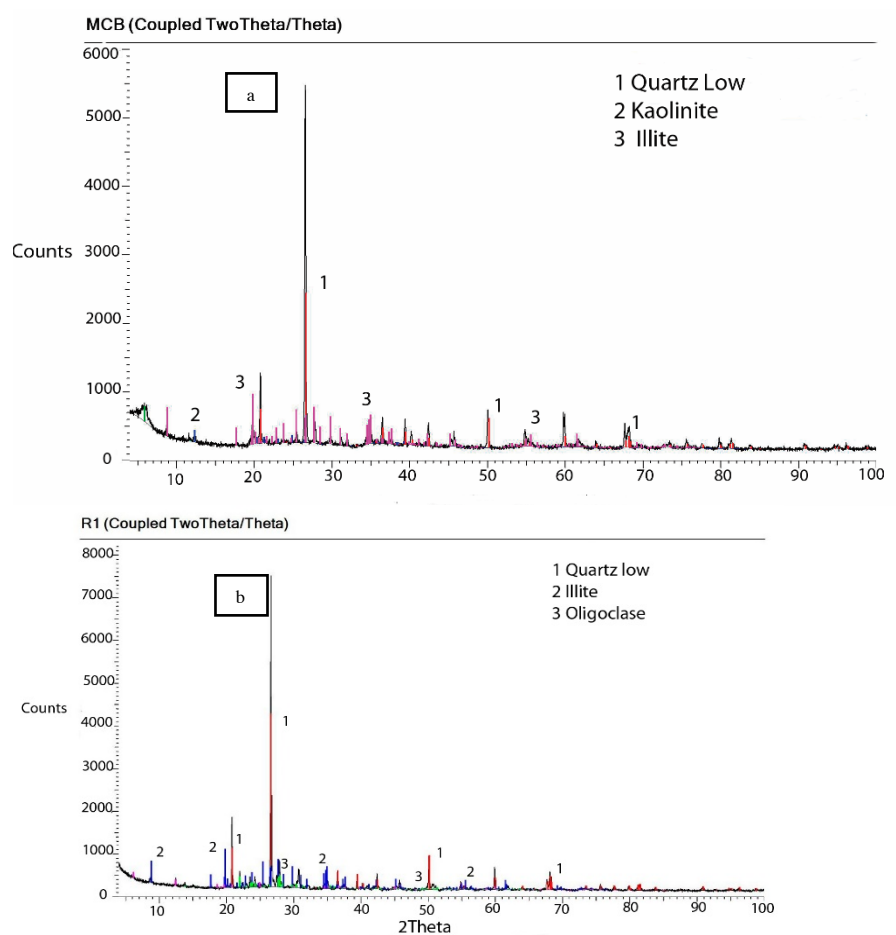


Fig. 4 Difractograma de rayos X: a) MCB: Ceibopamba, b) R1: Relave de Mina **Fuente:** Elaboración propia

La Fig. 5 muestra el análisis de la curva TGA para la muestra de Ceibopamba, primero se observa el proceso endotérmico debido al calentamiento inicial hasta los 120 °C, perdiendo un 2,202% de su masa. El pico a los 75 °C de la curva de DSC indica pérdida de masa. Así mismo en el tramo entre 120 y 170 °C la curva TGA se disminuye un 0,297 %, debido a la pérdida de agua higroscópica de la Illita.

Arsenović, et al (2014) define que la oxidación de la materia orgánica se logra entre las temperaturas de 200 y 500 °C, a temperaturas de 310° y 610 °C se presenta la mayor pérdida de masa en un 2,245% y un pico en la curva DSC a 490°C que muestra la disminución de la masa en este tramo. La dehidroxilación del mineral illita se manifiesta a 573,43 °C (curva D2-DSC).

Linares, et al (2013) define que la metacaolinita, es una evolución de la caolinita y al ser elevada a los 950 °C la sílice se transforma en cristobalita y se forma una estructura de espinela. Los termogramas registrados para las muestras de Cangahua, Chinguilamaca, Palanda y Arena fina muestran eventos térmicos similares.

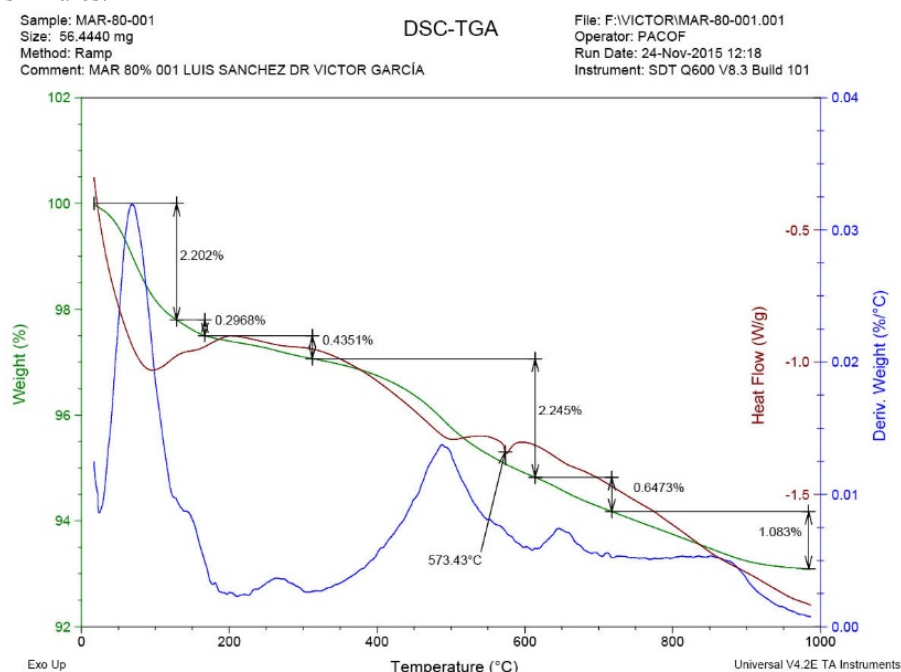


Fig. 5 Termograma de la muestra de Ceibopamba. **Fuente:** Elaboración propia

4.2 Resultados del ensayo de compresión diametral.

4.2.1 Ladrillos mejorados (LM)

Debido a la variedad de combinaciones entre materiales y sus diversos porcentajes de dosificación, es necesario tomar como indicador los mejores valores del FO para la optimización de las mezclas. De cada combinación se seleccionó el mayor valor de FO, a excepción de la mezcla entre la mina de Palanda y Arena fina que presenta valores son bajos.

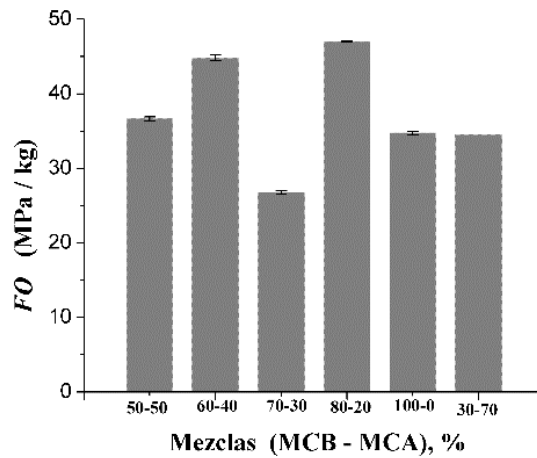
Por ejemplo en la Tabla 2 se presenta la combinación entre Ceibopamba y Cangahua, determinando la mezclas óptimas en porcentajes de 60/40 y 80/20, mostrando mayor valor en el ensayo de compresión diametral (ft), menor contracción después del secado (C_{ss}) y contracción total (CT).

Tabla 2. Resultados de compresión diametral (ft) y contracción (CT) para la mezcla: Ceibopamba (MCB) y Cangahua (MCA). (Del Coz Díaz, et al 2011)

Mezcla	Porcentaje (%)	ft (Mpa)	FO (MPa/kg)	Css (%)	CT (%)
MCB/MCA	50/50	3,91	36,61	8,88	9,67
	60/40	4,49	44,79	3,31	6,75
	70/30	2,60	26,77	3,51	11,28
	80/20	4,72	47,00	3,25	5,51
	100/0	3,50	34,72	6,66	10,30
	30/70	3,52	34,53	2,18	7,01

Además el FO indica los valores más altos para las mezclas en porcentaje de 60/40 y 80/20, esto se puede observar en la Fig. 6.

Fig. 6 F.O de la mezcla de Ceibopamba y Cangahua.
Fuente: Elaboración propia

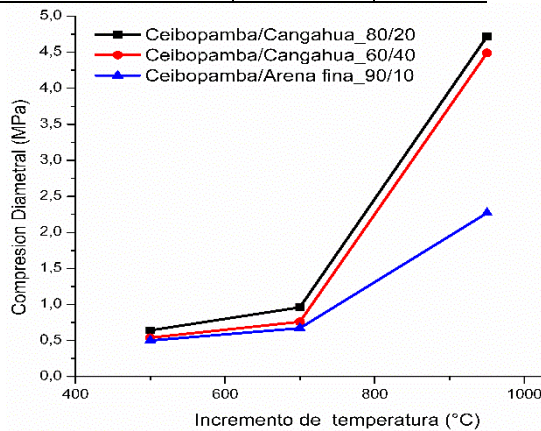


De igual forma se procedió con todas las combinaciones establecidas en la Fig. 1 y se obtuvo un total de seis mezclas óptimas que se presentan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3 Mezclas con mejores factores de optimización (F.O).

ID	MUESTRA 1	MUESTRA 2	Porcentaje (%)	F.O Mpa/Kg
1	Mina Ceibopamba	Mina Cangahua	80/20	47,0
2	Mina Ceibopamba	Mina Cangahua	60/40	44,79
3	Mina Ceibopamba	Mina de Arena Fina	90/10	20,7
4	Mina Ceibopamba	Mina Palanda	70/30	16,45
5	Mina Ceibopamba	Mina Chinguilamaca	70/30	22,37
6	Mina Chinguilamaca	Mina de Arena Fina	90/10	17,17

A fin de obtener una curva de la variación del esfuerzo de compresión diametral versus la temperatura de cocción (Fig. 7) se elaboró discos de los mejores valores de FO por ejemplo de los ID 1, 2, 3 (Tabla 3), concluyendo que la mejor



temperatura de cocción es de 950 °C.

Fig. 7 Variación del esfuerzo de compresión diametral en función de la temperatura. **Fuente:** Elaboración propia

4.2.2 Ladrillos ecológicos (LE)

La primera variable analizada a través de discos fue la temperatura manteniendo constante el contenido de solución (CS) y la concentración molar (CM), donde se obtuvo un incremento de FO de 3.29 a 8.25 MPa/kg con temperaturas de 90 y 180 °C respectivamente. Los resultados mostraron que la temperatura es beneficiosa en estas condiciones. (Tabla 4).

Tabla 4 Resultados de compresión diametral (CS y CM constante) a diferentes temperaturas

CS (%)	CM (M)	T (°C)	D (cm)	E (cm)	Carga (kg)	σ_t (MPa)	FO (MPa/kg)
22	10	90	5.04	1.65	22.60	0.169	3.29
		120	5.05	1.81	26.17	0.180	3.68
		150	5.04	1.54	42.80	0.342	6.44
		180	5.07	1.62	58.76	0.439	8.25

Ahora, si el contenido de solución aumenta, hay una diferencia en los resultados (Tabla 5), observando una disminución apreciable en los valores de FO cuando el contenido de solución cambia de 24% a 26%. El descenso de estos valores se debe a la rápida evaporación de la solución sin posibilidad de que se desarrolle el proceso químico.

Tabla 5 Variación de CS y su efecto en el ensayo de compresión diametral.

CS (%)	CM (M)	T (°C)	D (cm)	e (cm)	Carga (kg)	σ_t (Mpa)	FO (MPa/kg)
24	10	90	5.07	1.55	27.84	0.220	4.31
		120	5.03	1.55	86.39	0.691	14.99
		150	5.09	1.52	42.14	0.336	6.46
		180	5.15	1.58	40.20	0.315	6.08
26	10	90	5.11	1.36	23.41	0.211	0.21
		120	5.11	1.45	69.38	0.587	0.59
		150	5.03	1.49	28.77	0.241	4.84
		180	5.20	1.51	26.85	0.211	4.2

Por último, se ha relacionado la concentración molar (CM) y el contenido de solución (CS) a diferentes temperaturas resultando una resistencia de 5 MPa/kg a un CM de 15 y un CS de 22%, del mismo modo si se varía únicamente el CS a 26% con temperatura de 90 °C se logra incrementar tres veces más la resistencia.

La concentración molar confiere buenas propiedades mecánicas a los discos resultando valores cercanos a los 21 MPa/kg a temperaturas de 120 °C con un CS de 26% y un CM de 15; es importante indicar que un aumento de solución origina una alteración en el proceso de geopolimerización debido al exceso de saturación de la materia prima sin alcanzar la precipitación del gel aluminio – silicato.

4.2 Resultados de compresión simple

La Fig. 8a presentan los resultados del ensayo de compresión simple tanto de los LPA como LM y su comparación con la normativa ecuatoriana. Los LPA muestran valores máximos de resistencia de 5 MPa no cumpliendo con la norma (min 8MPa), relacionados con la optimización de mezclas los LM aumentan su resistencia en un 400% alcanzando valores de 20 MPa. Este incremento en la resistencia se debe a la formación de la estructura de espinela la cual se produce mediante la transformación de la sílice en cristobalita al ser elevada la materia prima a 950 °C.

El ladrillo elaborado mediante geopolimerización con una concentración alcalina de 15M y contenidos de solución de 26%, presenta buena resistencia a la compresión resultando una media de 12.1 MPa, lo que indica que el proceso químico formó una estructura estable debido a la disolución de los componentes de sílice y alúmina y su respectivo endurecimiento en la etapa de policondensación. Adicionalmente, la temperatura es un factor importante que afecta al proceso químico y consecuentemente al comportamiento mecánico de los ladrillos. Para los residuos de minería utilizados en esta investigación, la temperatura de curado óptima es 120 °C.

Por lo tanto, si la selección de las condiciones de preparación de los especímenes es adecuada, los ladrillos ecológicos pueden ser producidos a partir de residuos de minería, cumpliendo los requisitos de la norma.

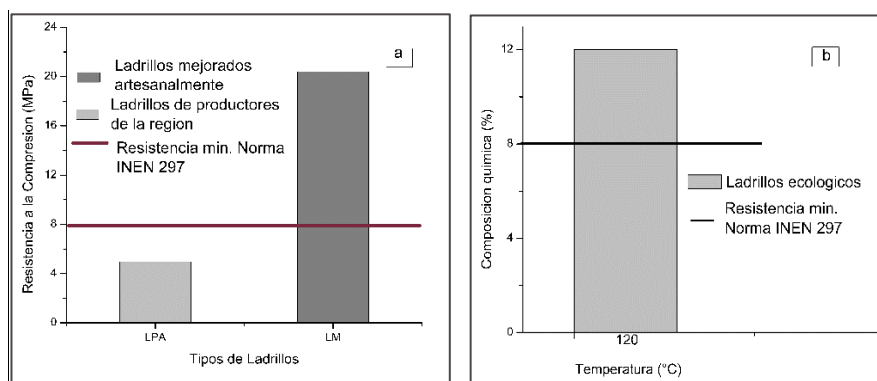


Fig. 8 a) Resultados de compresión simple vs tratamiento térmico b) Resultados de compresión simple para los diferentes tipos de ladrillos. **Fuente:** Elaboración propia

5 Conclusiones

Los resultados indican una notable resistencia de LM aplicando el ensayo de compresión simple. Se obtuvo un incremento de 400 % en relación a los LPA, cumpliendo la normativa ecuatoriana, logrado a través de la mezcla óptima entre las minas de Ceibopamba y Cangahua en porcentaje de 80/20 respectivamente. De esta manera se reduce el impacto ambiental producto de la explotación intensiva en las minas de arcilla por el desconocimiento en las dosificaciones de las mezclas.

Los residuos de minería son candidatos idóneos para la fabricación de LE, debido a que presentan características químicas y mineralógicas aceptables para promover el proceso de geopolimerización. Los valores óptimos son 26% de contenido de solución, concentración alcalina de 15M y temperatura de 120 °C los cuales proveen características mecánicas ideales para su uso en la construcción, superando los valores mínimos sugeridos por la normativa ecuatoriana en un 150%. El uso de los relaves de minera en la fabricación de ladrillo es técnicamente factible y una alternativa al uso de arcillas, reduciendo el impacto ambiental, generado en el proceso de cocción de ladrillos artesanales por la quema de leña altas temperatura

6 Referencias

- Arsenović, M., Pezo, L., Mančić, L., & Radojević, Z. (2014). Thermal and mineralogical characterization of loess heavy clays for potential use in brick industry. *Thermochimica Acta*, 580, 38–45. <http://doi.org/10.1016/j.tca.2014.01.026>
- Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y., & Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailing. *Constr. Build. Mater*, 2107-2111.
- García, V. J., Zúñiga-Suárez, A. R., Márquez, C. O., Pérez, J. G., Fernández-Martínez, F., & Hernández-Olivares, F. (2016). Strength developing in clay-Andesite Brick. *Materials Sciences and Applications*, 403-420. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2016.78037>.
- Del Coz Díaz J.J., García Nieto P.J., Álvarez Rabanal F.P., & Lozano Martínez-Luengas, Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method, *Eng. Struct.* 33 (2011) 1–9. doi:10.1016/j.engstruct.2010.09.012.
- Linares, J., Huertas, F., & Capel, J. (2013). La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento.
- Quillupangui-Peñaherrera, L. C., & Villa Cevallos, T. W. (2011). Diseño y Simulación de un sistema para ladrillo crudo con medidas 34x16x7.
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas.
- Roy, S., Adhikari, G., & Gupta, R. (2007). Use of gold mill tailings in making bricks: a feasibility study. *Waste Manage Res*, 475-482.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Técnica de Loja.