

Obtención de ladrillos tipo tejuela mediante procesos de geopolimerización

Ramiro Correa-Jaramillo^{1*}, Francisco Hernández², Isarel Briceño¹

¹ Universidad Técnica Particular de Loja; racorrea@utpl.edu.ec

² Universidad Politécnica de Madrid; f.hernandez@upm.es

* Correspondence: racorrea@utpl.edu.ec; Tel.: (+593991874180)

Resumen

El ladrillo es ampliamente utilizado en la construcción, pero a menudo se convierte en escombros debido a su uso y falta de calidad. En Ecuador, la producción de ladrillos no está industrializada, lo que resulta en propiedades deficientes para la construcción. En la ciudad de Loja, la mayoría de los ladrillos provienen de fábricas artesanales. Esta investigación propone utilizar la geopolimerización y ladrillos de desecho para crear un material sostenible en la construcción. Se utilizaron procesos de geopolimerización con hidróxido de sodio como activador alcalino. Los productos resultantes fueron sometidos a diversos ensayos para obtener la mejor fórmula en términos de comportamiento y resistencia del material. Se realizaron pruebas de propiedades físicas y mecánicas, y se analizó su aplicación en envolventes de edificaciones con uso de residencia de interés social. Los resultados mostraron que el nuevo material, utilizado como revestimiento en fachadas, puede reducir la demanda de calefacción y refrigeración. En un estudio de caso en Loja, se observó una disminución significativa en días grados de calefacción y refrigeración. Esta investigación abre nuevas posibilidades en el uso de materiales reciclados en la construcción y puede contribuir al conocimiento en este campo.

Keywords: geopolymerization, brick waste, brick veneer

1. Introducción

Esta investigación realiza aportaciones como alternativas de solución para los residuos en la construcción determinados como la principal fuente de contaminación en esta industria. En Ecuador, los residuos de la construcción alcanzan valores de 72 mil toneladas (2013); sin existir una clasificación adecuada de estos [1] y que llegan directamente a las escombreras en el mejor de los casos.

El residuo de ladrillo tiene un gran potencial para ser reciclado y reutilizado como material de construcción, siendo una alternativa amigable con el ambiente a través de un manejo sostenible y reduciendo el uso de recursos naturales¹ en la fabricación de materiales [2]. La presente investigación pretende llegar a determinar si el material local cumple con los requisitos previos para ser activados

¹ Como dato de referencia, para la elaboración de ladrillos, en las proximidades del cantón Catamayo, cercano a la ciudad de Loja en Ecuador, se estima un uso de 20 m³ de madera combustible para la producción de 10.000 ladrillos

alcalinamente, determinar las mejores combinaciones y estimar sus aportaciones en la aplicación arquitectónica de este ladrillo recompuesto.

Por otro lado, la fuente de aluminosilicatos para la conformación de geopolímeros que presentan los residuos de ladrillos por su composición química lo definen como un material inorgánico con propiedades de tipo cerámico; que pueden ser producidos a temperatura ambiente o temperaturas ligeramente altas [3], que es en donde existe la aportación de esta investigación, disminuyendo la emisión de CO₂, con una solución alcalina en una matriz que presenta sílice y alúmina [4].

De lo anterior, esta investigación ha sido diseñada para desarrollar mediante comprobación experimental, la factibilidad para la fabricación de ladrillos con triturados “finos” de ladrillos cocidos, sometidos a bajas temperaturas; mediante procesos de geopolimerización, por lo que se estudian las propiedades físicas de: densidad, porosidad, permeabilidad, determinación de manchas y eflorescencias, además de tipo mecánico; con su comportamiento a compresión, flexión, rigidez de material; y, complementariamente con propiedades térmicas del material resultante del proceso de geopolimerización, como una primera fase. Luego la caracterización térmica del ladrillo permitirá su evaluación en la aplicación de este como elemento de revestimiento en edificaciones, procediendo con la simulación computacional aplicado en un caso de estudio, ocupando los datos arrojados experimentalmente, esto nos permitirá llegar a pronosticar su comportamiento de aporte térmico considerándose como una estrategia de confort adaptativo a las edificaciones de la ciudad de Loja.

2. Materiales y métodos

Fabricar y evaluar las propiedades del ladrillo tipo tejuela (LTT) se lo establece en las siguientes etapas:

Primera etapa: 1A. exploración y extracción de materia prima mediante muestreo aleatorio, para su posterior trituración.

Segunda etapa: 2A. caracterización de la materia prima, mediante ensayos físicos, químicos y mineralógicos.

Tercera etapa: 3A. diseño experimental de la mezcla óptima. En esta etapa se elabora discos para evaluar la capacidad máxima de carga que puede soportar una combinación antes de fallar; mediante el ensayo de compresión diametral. Este ensayo permite determinar el factor de optimización (FO), parámetro que determinará la combinación óptima, para ser aplicado en el prototipo.

Cuarta etapa: 4A. fabricación Prototipo LTT, con la mejor combinación establecida en las etapas anteriores.

Quinta etapa: 5A. caracterización mecánica del LTT

Sexta etapa: 6A. determinación de la transferencia de calor del LTT

Séptima etapa: 7A. simulación computacional con valores de conductividad térmica del LTT y las bases climatológicas de acceso abierto, para el caso de estudio

3. Resultados

Se seleccionan cuatro fábricas de ladrillos de forma aleatoria en las localidades de Malacatos y Catamayo, fuentes de suministro de este material para la ciudad de Loja, Ecuador. La mayoría de las construcciones en esta ciudad provienen de estas fábricas artesanales, por lo tanto, los residuos de ladrillos (RL) estarán asociados a ellas.

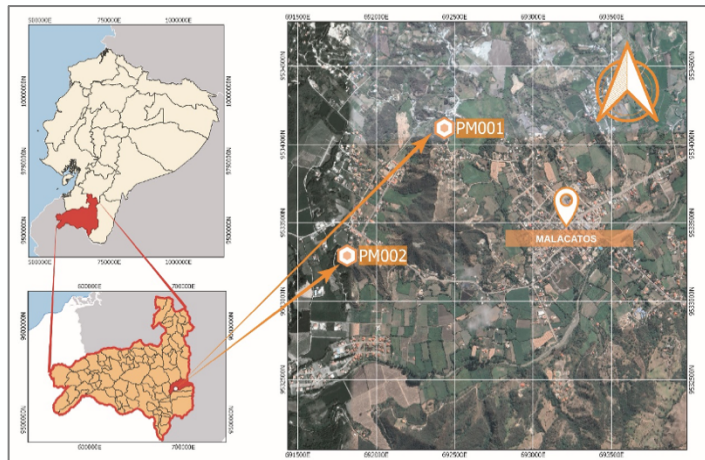


Figure 1. Mapa de ubicación de los productores PM001 y PM002 en la ciudad de Malacatos. Provincia de Loja – Ecuador

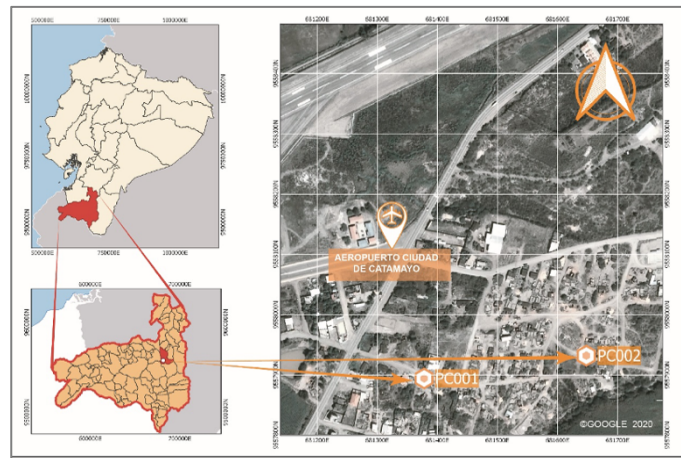


Figure 2. Mapa de ubicación de los productores PC001 y PC002 en la ciudad de Catamayo. Provincia de Loja – Ecuador

3.1 Proceso experimental

Una vez recolectadas las muestras que serán analizadas en laboratorio, se realiza la caracterización de la materia prima, evaluando sus atributos y propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Esta caracterización proporcionó información sobre los componentes que

serán utilizados en el proceso de geopolimerización y permitirá predecir su comportamiento, para la fabricación del LTT.

La molaridad de la solución alcalina, el contenido de solución alcalina, la carga o fuerza de estabilización; y, la temperatura de curado, son las variables que influyen en el proceso de fabricación del LTT que son consideradas en el FO, para determinar la combinación óptima.

Los residuos utilizados para la fabricación de las probetas fueron el resultado de una mezcla homogénea de los residuos constituidos de las tres fábricas de ladrillos.

Para finalizar esta fase, las probetas fueron sometidas al ensayo de compresión diametral, para la obtención del factor de optimización (FO). El mismo que sería el componente esencial para la correcta selección de la combinación óptima².

3.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)³

La fluorescencia de rayos X permite determinar la composición química de los RL, mediante espectrometría. En la Figure 3; y, Table 1, se muestran los resultados obtenidos.

Table 1. Fluorescencia de rayos X

Muestra	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	K ₂ O %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	Otros %	Total %	Σ Óxidos >70%
PC001	15.90	58.00	1.86	3.34	6.18	14.72	100.0	80.08
PC002	15.10	53.30	1.53	3.35	5.90	20.82	100.0	74.30
PM001	13.30	67.00	2.04	0.95	4.04	12.67	100.0	84.34
PM002	17.00	61.30	2.84	1.39	5.59	11.88	100.0	83.89

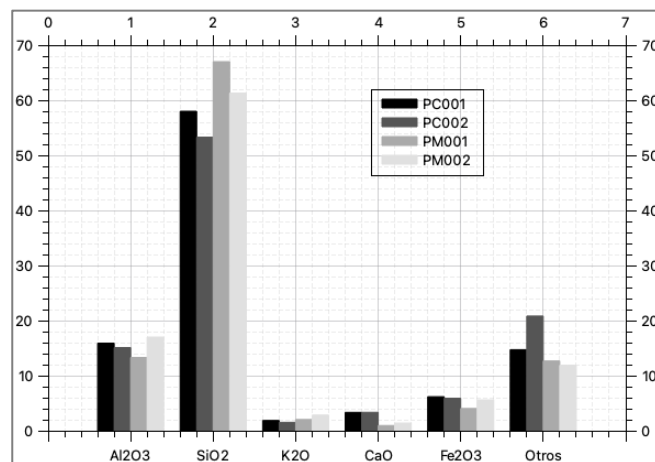


Figure 3. Porcentaje de fluorescencia de rayos x, por código de fábrica

La suma de Al₂O₃ + SiO₂ + Fe₂O₃, en los RL es mayor a 70%, por lo que se los puede clasificar como un material puzolánico idóneo para ser una

² Esta prueba estará basada en la técnica definida como "brazilian disc test", introducido de acuerdo con la literatura como un sustituto de la prueba de tracción directa en materiales frágiles [11]

³ Revisado en <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-02017682/document>, 16/07/2022

fuelle de aluminosilicatos para procesos de geopolimerización [5]. Además, se encuentran compuestos por óxidos de potasio y calcio que son beneficiosos para el proceso de geosíntesis.

Según el documento de Rodríguez et al. ⁴, el incremento en la cantidad de silicatos solubles y concentración del ion alcalino a través del aumento en las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ respectivamente, afecta negativamente el comportamiento mecánico de los materiales geopoliméricos. Para el caso de los residuos PC001, PC002 y PM002 se encuentran dentro de los rangos óptimos: 3-3.8, que permitirían resistencias mecánicas muy altas en los productos geopoliméricos [6]. Y en el caso del residuo PM001 presenta una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 5.154, que no permitirían el desarrollo completo de la resistencia en los geopolímeros.

3.3 Difracción de rayos X

El análisis químico de difracción de rayos X (DRX) es un proceso de dispersión de RX a los átomos que constituyen al suelo irradiado. Los rayos inciden una longitud de onda fija, y cada plano de átomos produce un pico de difracción en un ángulo específico. Cada pico es producido por una familia de planos atómicos, es decir por una especie mineral identificada, permitiendo identificar y cuantificar especies minerales de los suelos [7]

Para este caso, se tritura la muestra usando una trituradora eléctrica de mandíbula⁵, homogenizada la muestra (levantando las esquinas de la superficie plástica alrededor de 15 veces). Se la estratifica en varias secciones. Se toma una parte de cada sección y se coloca en un nuevo recipiente. Se vuelve a pulverizar la nueva muestra con la ayuda de una pulverizadora con molino de anillos⁶. Se recomienda usar un programa que conste con una velocidad de 700 revoluciones por minuto, en un periodo de tiempo de 3 min.

Se colocan 10 gramos de la muestra pulverizada en discos, y se analiza en el difractómetro⁷, por un periodo de 40 minutos. Se carga el espectro cristalino obtenido, para la búsqueda de los respectivos minerales.

En la Figure 4; se presenta el resultado del DRX de las muestras PC001, PC002, PM001 y PM002 respectivamente.

⁴ Rodríguez, Erich, & Bernal, Susan, & Mejía de Gutiérrez, Ruby, & Gordillo, Marisol (2009). Efecto de los módulos $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un meta caolín. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (49),30-41.[fecha de Consulta 12 de Julio de 2022]. ISSN: 0120-6230. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43019324003>

⁵ Retsch BB100

⁶ Retsch RS 200

⁷ D8-ADVANCE

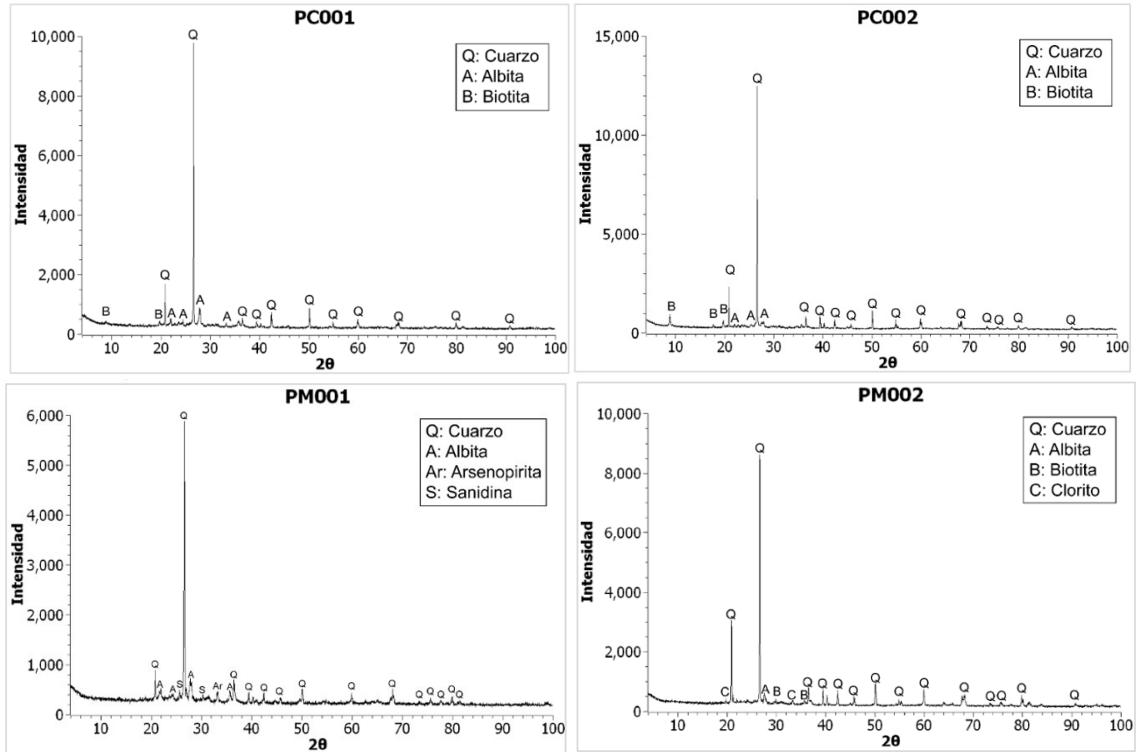


Figure 4. Difracción de rayos X: PC001- PC002 – PM001 – PM002

De acuerdo con los resultados del ensayo mineralógico, el cuarzo, albita, biotita, arsenopirita y clorita, son los minerales que se encontraron en los RL, destacándose el cuarzo, que presentó los picos más altos desde 20° hasta los 30°, y fue el mineral con más presencia en los DRX. Por lo tanto, los RL están compuestos por materiales cristalinos que contienen una gran cantidad de silicio.

Por otro lado, la molaridad y contenido de la solución alcalina, la presión de estabilización y la temperatura de curado son las variables que influyen en el proceso de estabilización del suelo aplicando geopolimerización. [8].

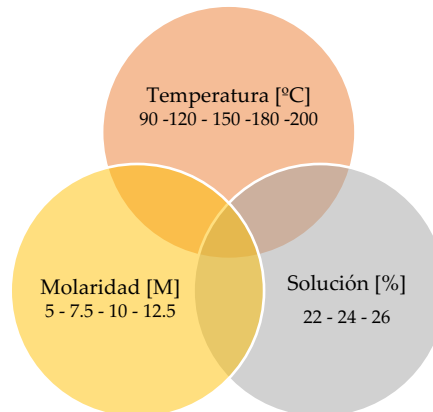


Figure 5. Variables para determinar la combinación de mezcla óptima

Con las variables identificadas se realizaron 60 combinaciones, elaborando 4 probetas por combinación, con las siguientes dimensiones: 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor. Todas fueron sometidas a 39.2266N. Luego de lo cual, a las probetas se les realizó el ensayo de compresión diametral (Brazilian Test) [9], para la obtención del factor de optimización (FO) para concluir la mezcla óptima, para su siguiente aplicación en el LTT.

La molaridad de la solución alcalina es el contenido de moles de hidróxido de sodio en la solución, que para el caso de esta investigación las analizadas son: 5M, 7.5M, 10M y 12.5M.

Para la elaboración de la solución se deberá considerar el contenido de moles(M) disuelto en 1000 (ml) de agua destilada, considerando el peso molecular del NaOH⁸.

Para esta investigación se utilizó vasos de precipitado de 250 (ml) y 100(ml). En la Table 2, se presenta las dosificaciones usadas para cada vaso de precipitación.

Table 2. Dosificación de molaridad

Capacidad de Vaso de Precipitado	Molaridad	Cantidad de NaOH en 1000(ml)	Cantidad de NaOH en 100(ml)
A(ml)	B(M)	C (g)	D (g)
250	12.5	500	125
	10	400	100
	7.5	300	75
	5	200	50
100	12.5	500	50
	10	400	40
	7.5	300	30
	5	200	20

Para el contenido de solución y presión de moldeo se considera el porcentaje que representa la solución de un 100% de combinación suelo y solución. Los contenidos estudiados son: 22%, 24% y, 26%⁹.

Table 3. Contenido de solución en la combinación suelo-solución

Contenido de solución (%)	Contenido de suelo (%)	Contenido suelo-solución (%)
22	78	100
24	76	100
26	74	100

Por otro lado, en 4 probetas cilíndricas de 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor, se les aplicó distintas cargas: 9.80665N, 19.6133N, 29.41995N,

⁸ Para conocer la cantidad de NaOH que se necesita disolver para la solución alcalina, deberemos calcularlo multiplicando los 12.5 M x 40 g/mol (peso molecular), considerando disolverlo en 1000 ml de agua destilada.

⁹ Zúñiga Suárez, Alonso (2018). Ciencia e ingeniería de nuevos materiales en la fabricación de ladrillos mejorados tecnológicamente. Tesis (Doctoral), E.T.S. Arquitectura (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.52643>.

39.2266N, de estabilización con la prensa hidráulica con una misma combinación suelo-solución-temperatura. Identificando, que la presión que permite un correcto desmolde sin fracturas fue aquella a 39.2266N, por lo que para la ejecución de todo el estudio se usó esta presión. Ya que a 9.80665N, 19.6133N y 29.2266N, el disco no soportaba ni su propio peso, y se desmoronaba fácilmente, tal como se evidencia en la Figure 6, llegando a necesitar aproximadamente 500g de suelo – solución, de esta cantidad al menos 411g deben ser solo de suelo¹⁰.



Figure 6. Discos con presiones inferiores a 39.2266N

La temperatura de curado; es otro factor primordial para completar la geopolimerización. Las temperaturas de 90°C, 120°C, 150°C, 180°C y 200°C fueron aplicadas durante 8 horas en la estufa de secado, luego pasaron por un periodo de 7 días a temperatura ambiente, evitando así el choque térmico, antes de ser ensayadas a compresión diametral.

4. Discusión

La concentración de solución del 26%, como se enseña en la Figure 7, permite determinar lo siguiente:

- a. Para una molaridad de 5, se puede apreciar que el aumento del FO es directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 180°C en el cual presenta un pico de 7.15 MPa/kg, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al incremento de la temperatura de curado.
- b. Para una molaridad de 7.5, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 7.32 MPa/kg y 7.34 MPa/kg en las temperaturas de curado

¹⁰ Para preparar una combinación suelo-solución elaborando 4 probetas de 7 cm de diámetro y 2 cm de espesor, la cual va a ser sometido a 39.2266N de presión de moldeado. El contenido de solución es del 22%. Se conoce que la cantidad de suelo debe ser de 411 gramos para la fabricación de los 4 especímenes. ¿Cómo calcular la cantidad de solución necesaria?

$$\frac{78\%(C.Suelo)}{22\%(C.Solución)} = \frac{411(g \text{ de suelo})}{X(g \text{ de solución})}$$

$$X = \frac{411 \times 22\%}{78\%}$$

$$X = 115,92(g \text{ de solución})$$

de 120°C y 180°C respectivamente, en comparación a las demás temperaturas.

- c. Para una molaridad de 10, se puede apreciar una mayor magnitud del FO: 9.27 MPa/kg en las temperaturas de curado de 200°C, en comparación a las demás temperaturas.
- d. Para una molaridad de 12.5, se puede apreciar un aumento del FO directamente proporcional al aumento de la temperatura hasta los 150°C en el cual presenta un pico de 14.84 MPa/kg, seguido por el decrecimiento del FO directamente proporcional al aumento la temperatura de curado.

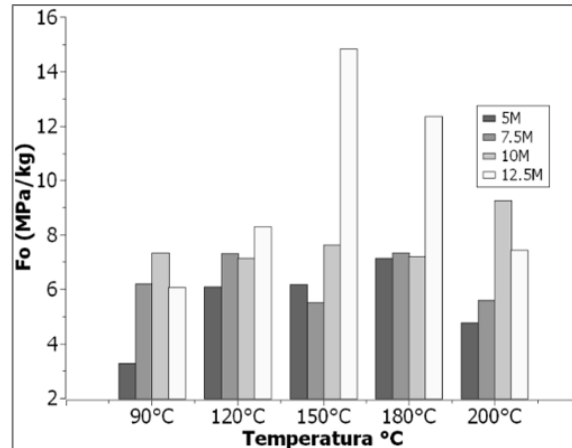


Figure 7. Concentración de solución 26%

De acuerdo con el análisis realizado, el comportamiento térmico más común de los discos indica que existen dos rangos de temperatura. En el primer rango (90°C - 150°C), el FO es directamente proporcional a la temperatura de curado y en el segundo rango (150°C - 200°C) el FO es inversamente proporcional a la temperatura de curado.

De lo anterior, el análisis permite inferir que el aumento excesivo de la temperatura afecta de forma negativa en las propiedades mecánicas del material. En la Figure 8, se puede observar las fisuras generadas bajo una temperatura de curado de 200°C.

Por lo expuesto, se determinó que la temperatura óptima de curado es 150°C, siendo esta en la que se obtuvo las magnitudes de FO más altas y además representó el límite térmico a partir del cual empiezan a disminuir las propiedades mecánicas del material.

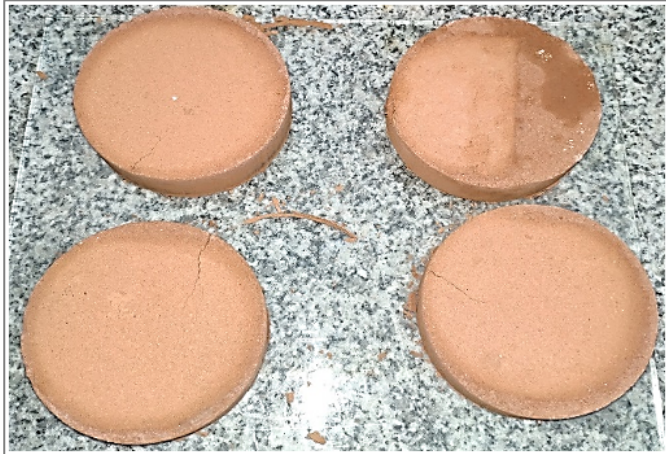


Figure 8. Fisuras generadas por exceso de temperatura de curado

En base al análisis de la selección de las variables de diseño, para la elaboración de los discos, se realizó un análisis del efecto de la concentración molar en el FO, frente al contenido de solución en las distintas temperaturas de curado.

Con una temperatura de curado de 90°C y 200°C, como se exhibe en la Figure 9, se puede observar lo siguiente:

El FO tiende a incrementarse en la misma proporción que aumenta la concentración molar hasta 10 M, luego de esta molaridad decrece el FO.

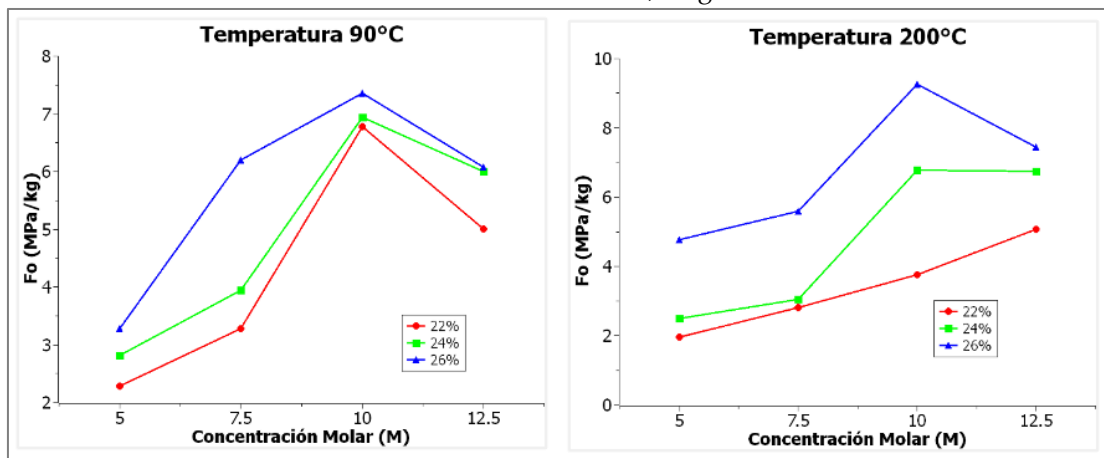


Figure 9. Efecto de la concentración molar: a) 90 C y b) 200 C

Con una temperatura de curado de 120°C, 150°C y 180°C, como se muestra en la Figure 10, se puede observar que el FO tiende a incrementarse en la misma proporción que aumenta la concentración molar.

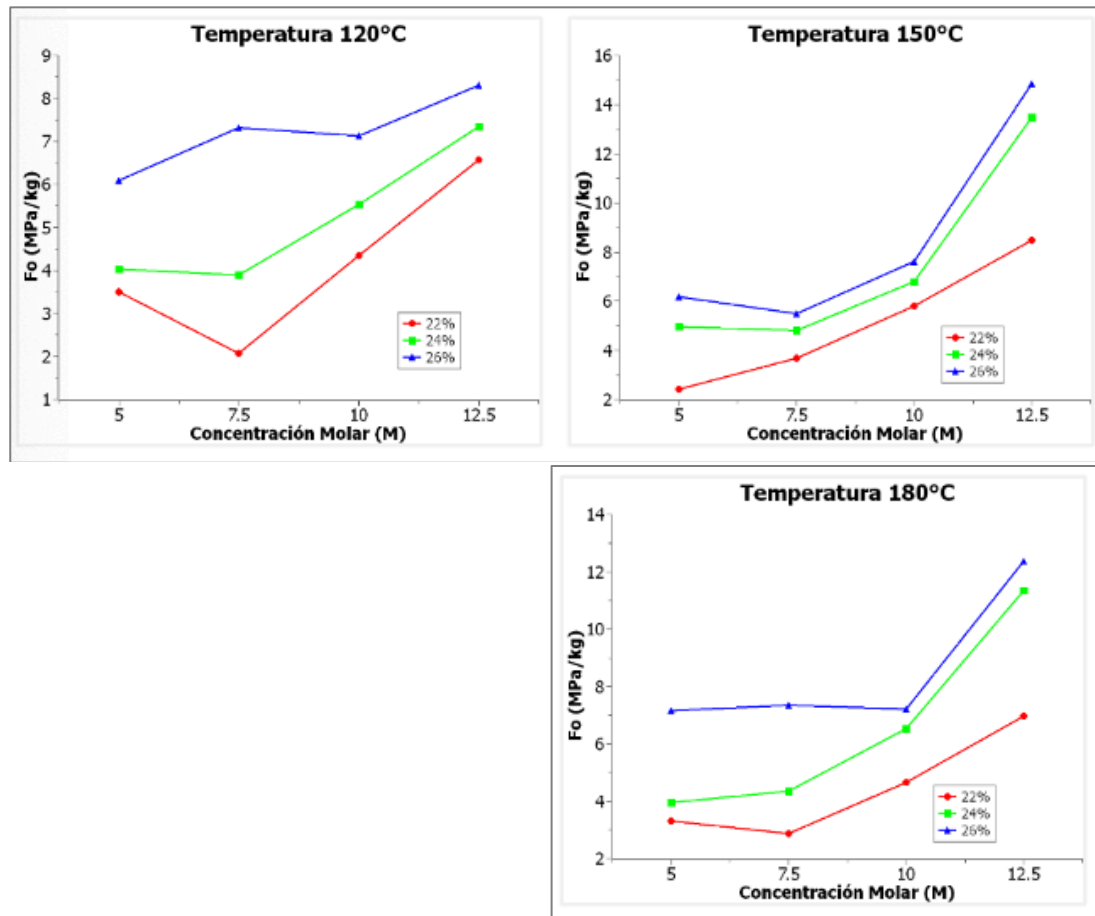


Figure 10. Efecto de la concentración molar: a) 120°C, b) 150°C y c) 180°C

Luego, de acuerdo con el análisis realizado el comportamiento que presentan los discos al aumentar la concentración molar tiende a incrementar el FO. Esto sucede porque al ser la molaridad alta las partículas de la fuente de aluminosilicatos reaccionan rápidamente y en su totalidad, permitiendo que la etapa de disolución sea efectiva, constituyéndose en la base para completar un óptimo proceso de geopolimerización. Además, se puede observar que el contenido de solución afecta directamente al FO. En medida que aumenta el contenido de solución, también se incrementa el FO.

En las temperaturas de 90°C y 200°C ocurre un decrecimiento en la concentración molar de 12.5M, esto podría suceder por lo siguiente:

- Porque la temperatura de 90°C con una concentración alta de 12.5M, no permite el desarrollo completo del proceso de endurecimiento y geopolimerización por la baja temperatura.
- Porque la temperatura de 200°C con una concentración alta de 12.5M, afecta de forma negativa en las propiedades mecánicas del material por la alta temperatura.

Finalmente, la mezcla óptima será de: 12.5M-26%CS-150°C, con lo que a partir de esta mezcla se procederá con la construcción de los prototipos.

Una vez se determinó, la mezcla óptima, esta será aplicada en ladrillos tipo tejuela LTT geopolimerizados; en los cuales se ensaya la resistencia a la compresión basado en la normativa NTE INEN 297 (1977)¹¹, con lo que la mezcla de geopolimerización, cumple con los requisitos para un ladrillo macizo tipo C, excediendo este valor de 6 MPa en 15.51%; y, por otra parte, para la normativa española UNE 41410 (BTC 5) y el Earth Institute (Clase A) la mezcla cumple con los requisitos, superando al valor de la normativa de 5 MPa en un 38.61%, tal como se ve en la Figure 11

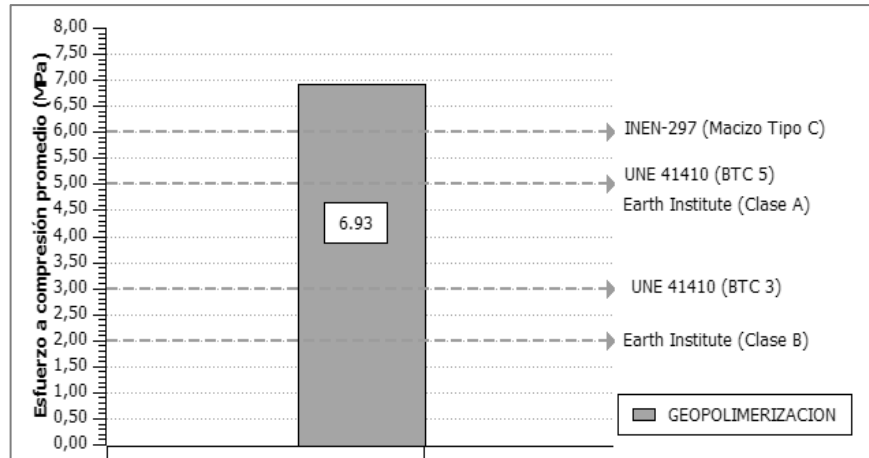


Figure 11. Resultados de resistencia a compresión

El procedimiento para el ensayo a flexión; se basó en la normativa NTE INEN 2554 (2011)¹². Al igual que el ensayo a compresión, se tomó el peso y las dimensiones respectivas; a cada uno de los prototipos, luego se colocó en la maquina respectiva teniendo en cuenta los apoyos: uno en la parte superior y dos apoyos en la parte inferior, aplicando una carga gradual a una velocidad constante hasta llegar a la rotura, se registró los datos y se procedió al cálculo del módulo de rotura. En este caso si comparamos, los prototipos con la normativa INEN-297, la mezcla no alcanza a cumplir con los requisitos para un ladrillo macizo cocido tipo C, quedando un 3.15% por debajo de la normativa, pues su resultado llegó a 1.937 Mpa, de los 2 Mpa que establece la norma. Ahora bien, es importante considerar que al no existir normativa para ladrillo tejuela, la comparativa se ha realizado con normativa de ladrillo tipo macizo, infiriendo que, este prototipo propuesto estaría cumpliendo con los requisitos básicos para poder aplicar envolventes arquitectónicas.

4.2 Análisis de eflorescencias de LTT

Uno de los factores a considerar en la producción del LTT, es la reacción que provocan los LTT con proliferación de eflorescencias por lo que en

¹¹ Revisado en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/297.pdf>, el 16/07/2022

¹² Revisado en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2554.pdf>, el 16/07/2022

el presente apartado se analizarán los resultados, de los análisis realizados a las muestras luego de estar al ambiente.

Según Lv et al. [10] en su reporte del estudio sobre “Inhibición de la eflorescencia en revestimientos inorgánicos de geopolímero a base de sodio”, la eflorescencia es un comportamiento espontáneo en un geopolímero a base de sodio, que implica la migración de álcalis solubles, pudiendo disolverse con agua, produciendo carbonatos blancos.



Figure 12. Prototipo LTT, con eflorescencias

Se procede a realizar un análisis DRX del prototipo de LTT, luego que ha pasado tiempo no menor a los 28 días, y este se ha encontrado en condiciones “normales” de exposición al factor intemperización. Los resultados arrojados son los que se pueden verificar en la Table 4.

Table 4. Fases minerales (compuestos químicos) detectados en la muestra

Compuesto mineral	Fórmula química	Semicuantificación (%)
Cuarzo	SiO ₂	73
Hematita	Fe ₂ O ₃	1
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	1
Moscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	20
Fosfato de aluminio hidratado	Al ₅ [(PO ₄) ₂ [(P,S)O ₃ (OH,O)] ₂ F ₂ (OH) ₂ (H ₂ O) ₈ •6.48(H ₂ O)	1
Sulfato de magnesio y potasio hexahidratado	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ •6(H ₂ O)	4

Las primeras cuatro fases cristalinas (cuarzo, hematita, albita y moscovita) corresponden a minerales que deben estar presentes en el ladrillo, las cuales son inocuas.

Los últimos dos compuestos identificados (fosfato de aluminio hidratado y sulfato de magnesio y potasio hexahidratado),

corresponden a fosfatos/sulfatos hidratados, que se pueden haber formado por la humedad en la superficie de los ladrillos.

Estos dos últimos compuestos pueden causar daño a los ojos e irritación de la piel y/o respiratoria, pero dado que su composición es baja y está ocupado en exteriores baja su riesgo de complicaciones por toxicidad.

Finalmente, es importante señalar que las eflorescencias no afectan a la resistencia mecánica y que se eliminan por acción de la lluvia, sin contaminar acuíferos, o con tratamientos de hidrofugación con siloxanos, o pudiendo también revestirse con una lechada o mortero de cal, o incluso con pinturas de silicato.

5. Conclusiones

- La caracterización química mediante el ensayo de DRX, determina que el material cumple con las condiciones de materia prima para el proceso de geopolimerización mediante el uso de hidróxido de sodio, debido a que muestra buenos contenidos de cuarzo (Q), por otra parte, los resultados del ensayo de FRX indica un contenido alto de óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3), el cual es altamente recomendado en mezclas geopoliméricas para formar aluminosilicatos y generar altas resistencias.
- La generación de un material de construcción a través de un proceso de geopolimerización usando los residuos de ladrillos como materia prima es viable, en función de los resultados experimentales obtenidos. La mezcla óptima que presentó un valor máximo de factor de optimización de 14.84 MPa/kg fue la de 12.5M-26%CS-150°C.
- Los ladrillos geopoliméricos tipo tejuela LTT, son una potencial alternativa de uso en envolventes arquitectónicas, comunes, debido a sus propiedades mecánicas y térmicas satisfactorias y su proceso de producción sostenible por: el bajo consumo de energía en comparación al proceso artesanal común, a la reutilización de residuos y a la reducción significativa del uso recursos naturales.
- La resistencia mínima para un ladrillo macizo cerámico tipo C en un ensayo de compresión corresponde a un valor de 6 MPa según los requisitos de la norma NTE INEN 297, dentro de esto se determina que los LTT cumplen con la solicitud alcanzando una resistencia promedio a compresión de 6,93 MPa.
- La resistencia mínima a flexión simple, de los ladrillos tejuela no cumple con los requerimientos de la norma NTE INEN 297, para ladrillos macizos cerámicos tipo C, alcanzando una resistencia a flexión de 1.937 MPa cuyo valor mínimo es 2.
- Los requerimientos según la norma NTE INEN 297, recomienda un porcentaje de absorción máximo de 25% para ladrillos macizos cerámicos tipo C, los ladrillos tejuela

presentan una porosidad calculada de 28,12% dando un porcentaje teórico de absorción del 24,95%, cumpliendo perfectamente las recomendaciones de la norma.

- Las eflorescencias no afectan a la resistencia mecánica y podrían eliminarse por acción mecánica con tratamientos de hidrofugación, o con siloxanos, o pudiendo también aplicarse una lechada o mortero de cal, o una pintura de silicato, para su protección.

6. Referencias

1. [1] INEC, "Instituto Nacional de Estadísticas y Censos," 2013.
2. [2] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.193.
3. [3] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications 3 rd edition*, no. January 2008. 2011.
4. [4] S. K. Amin, S. A. El-Sherbiny, A. A. M. A. El-Magd, A. Belal, and M. F. Abadir, "Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste," *Constr Build Mater*, vol. 157, pp. 610–620, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052.
5. [5] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, and T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review," *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 226–239, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.
6. [6] S. O. Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, and F. Tsobnang, "Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash," *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 301–311, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.102.
7. [7] N. Pardo, G. Penagos, M. Correa, and E. López, "Desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.BSECV.2021.09.003.
8. [8] A. M. Mustafa al Bakri *et al.*, "Geopolymerization method for soil stabilization application," US 2015/0016895 A1, 2015
9. [9] V. J. García, C. O. Márquez, A. R. Zúñiga-Suárez, B. C. Zúñiga-Torres, and L. J. Villalta-Granda, "Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights," *Int J Concr Struct Mater*, vol. 11, doi: 10.1007/s40069-017-0194-7.
10. [10] X. Lv, Y. Qin, Z. Lin, Z. Tian, and X. Cui, "Inhibition of Efflorescence in Na-Based Geopolymer Inorganic Coating," *ACS Omega*, vol. 5, no. 24, pp. 14822–14830, Jun. 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c01919.
11. [11] N. H. Faisal *et al.*, "Diametral compression test method to analyse relative surface stresses in thermally sprayed coated and uncoated circular disc specimens," *Surf Coat Technol*, vol. 357, pp. 497–514, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2018.10.053.