

## Efecto reforzante del vidrio reciclado en la elaboración de ladrillos artesanales

Rocío Tamayo<sup>1</sup>, Rivalino Guzmán<sup>1</sup>, Alcides López<sup>2,3,\*</sup>, Elisban Sacari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de San Agustín, Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales,

<sup>2</sup> Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias,

<sup>4</sup> Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ciencias, Escuela de Física Aplicada

### Resumen

Se reporta el mejoramiento de la resistencia a la compresión y disminución de la temperatura de cocción de ladrillos de arcilla reforzados con vidrio sodo-cálcico reciclado; en el diseño experimental se utilizó el algoritmo de Mc Lean y Anderson para mezclas de tres componentes con restricciones, obteniéndose 12 mezclas y una muestra patrón (sin vidrio), la materia prima se preparó previo análisis granulométrico y siguiendo los parámetros de la técnica artesanal, para la formación del bloque se usó un molde metálico, las muestras secas se calcinaron a 900 °C por 5 horas. Las propiedades físicas y químicas de las materias primas y las muestras calcinadas se midieron por medio del análisis granulométrico, porcentaje de humedad, límite de Atterberg, densidad, análisis mineralógico por Difracción de Rayos X, porcentaje de contracción, absorción de agua, morfología por Microscopía Óptica y Resistencia a la Compresión. Esta investigación confirma que es posible utilizar el vidrio sodo-cálcico reciclado o vidrio común como un componente en la producción de ladrillos de arcilla cocida, el mismo que cumple la función de reforzante cuando se mezclan 30 % de vidrio, 50 % de tierra de chacra y 20 % de greda y se calcinan a 900 °C, con estos parámetros de fabricación se obtuvo la máxima resistencia a la compresión de 28 MPa, mientras que la resistencia fue de 17 MPa cuando la temperatura de cocción fue de 800 °C. Según la norma de Albañilería E-007, el producto sería catalogado como ladrillo de tipo V, con mejor resistencia a la compresión.

### Abstract

We report the enhanced compression resistant and decrement of the annealing temperature of clay bricks, reinforced with recycled soda-lime glass. The Mc Lean and Anderson algorithm was used for three components mixture with restrictions, obtaining 12 mixtures and a pattern without glass, the reactive was prepared previous granular analysis and following the hand makers parameter and using a metallic mold, samples were annealed at 900 °C by 5 hours. Reactive and annealed samples were characterized determining physic and chemical properties by granular analysis, humidity rate, Atterberg limit, density, mineralogical analysis by X-ray diffraction, contraction rate, water absorption, morphology by optic microscopy and compression resistance. This research confirm the possibility of the use of soda-lime recycled glass as a component in the clay bricks production, working as reinforcing material, mixing 30 % glass, 50 % farm ground and 20 % of clay and annealed at 900 °C. At these conditions, a maximum compression resistance of 28 MPa was obtained; and of 17 MPa at an annealing temperature of 800 °C. According E-007 masonry standard this brick will be cataloged as one of type V with better compression resistance.

### 1. Introducción

El vidrio es un material muy común que raramente notamos su existencia, ya que está presente en formas tan diversas como: ventanas, vasos, envases de todo tipo, telescopios, en la industria nuclear como escudo de radiación, en electrónica como sustrato sólido para circuitos, en la industria del transporte, de la construcción, etc. Por sus características intrínsecas de brillantez, resistencia, transparencia, etc. el vidrio es un material difícilmente sustituible y a veces,

realmente insustituible. Igualmente son remarcables la disponibilidad y bajo costo de las materias primas usadas para producirlo, especialmente su componente más importante, la sílice (que se encuentra en la arena).

La producción nacional de vidrio, según el Índice de Crecimiento Industrial (ICI), señala que a pesar de que en los años 2006 y 2009 se registraron caídas de 0.18 % y 5.77 %, la

---

\* Correspondencia autor: alopez@ipen.gob.pe

década del 2000 en promedio tuvo variaciones anuales positivas, en el año 2010 registró un incremento de 29.52 % y en los primeros 8 meses del año 2011 registró un comportamiento positivo de 41.41 % [1].

El vidrio es 100% reciclable innumerables veces; sin embargo, solo se reciclan botellas y envases, siendo un problema ambiental los residuos de vidrios comunes (vidrios de ventanas sodo-cálcico, sector automotriz, etc.) no se reciclan, son llevados para su disposición final a botaderos y rellenos sanitarios. Considérese por ejemplo que en una ciudad como Arequipa se genera 0.76 kg/día per cápita y un total 662.44 t/día de residuos sólidos.

Agregando diferentes porcentajes de vidrio molido a mezclas de arcillas comunes se obtuvo el máximo resultado de resistencia a la compresión de 28 MPa, y como agente fundente con una temperatura de cocción de 800 °C, con una resistencia a la compresión de 17 MPa y según la norma de Albañilería E-007 sería catalogado como tipo de ladrillo V con mejor resistencia a la compresión [2].

## 2. Procedimiento Experimental

Las arcillas utilizadas en esta investigación fueron obtenidas de la zona de Polobaya y los vidrios usados de los residuos urbanos del distrito de Cayma.

### 2.1 Diseño experimental de mezclas

El estudio de la influencia de las adiciones de vidrio se hace mediante el diseño experimental para Mezclas con restricciones de Mc Lean Anderson [3], dirigidas a seleccionar la mejor mezcla para la fabricación de ladrillos de arcilla cocida para ello tenemos los niveles máximo y mínimos mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Descripción y características de las Materias Primas.

Materia prima	Función	Variable	Nivel Min	Nivel Max
Tierra cultivada	Desengrasante	X <sub>1</sub>	0.50	0.80
Greda	Compactante	X <sub>2</sub>	0.10	0.20
Vidrio	Reforzante	X <sub>3</sub>	0.10	0.30

Se deben cumplir las restricciones de acuerdo con las variables señaladas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Restricciones de las variables.

Restricciones
$0.50 \leq X_1 \leq 0.80$
$0.10 \leq X_2 \leq 0.20$
$0.10 \leq X_3 \leq 0.30$

Para que cumpla el algoritmo se tiene que ver las inconsistencias:

$$R_{X_i} = \sum X_{max} - \sum X_{min} \quad (1)$$

Remplazando en (1) se obtienen  $R_{X_1}$ ,  $R_{X_2}$  y  $R_{X_3}$  con valores 0.30, 0.10 y 0.20 respectivamente. Los  $RU$  y  $RL$  están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$RU = \sum X_{max} - 1 \quad (2)$$

$$RL = 1 - \sum X_{min} \quad (3)$$

Si los valores de  $RU$  y  $RL$  son 0.30 y 0.40, por lo que ningún  $R_i > RL$  y ningún  $R_i > RU$  para todo  $X_i$ , por lo tanto las restricciones no presentan inconsistencias y se puede usar el diseño de Mc Lean Anderson.

El número de experimentos se expresa como:

$$N = q^k (q-1)$$

De acuerdo con diseño experimental se elabora las mezclas que se muestran en la Tabla 3 y estas proporciones se pueden representar en un diagrama ternario mostrado en la Figura 1.

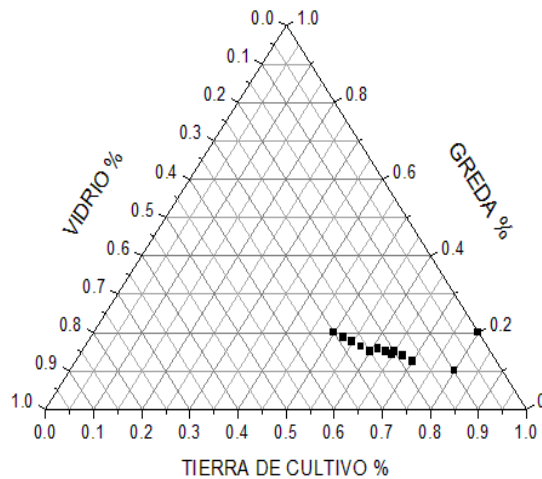
**Tabla 3.** Porcentajes de las materias primas en función al peso.

N° mezclas	T. Cultivo (X <sub>1</sub> )	Greda (X <sub>2</sub> )	Vidrio (X <sub>3</sub> )
0*	0.8	0.2	0
1	0.500	0.200	0.300
2	0.600	0.150	0.250
3	0.800	0.100	0.100
4	0.550	0.175	0.275
5	0.650	0.150	0.200
6	0.525	0.188	0.288
7	0.700	0.125	0.175
8	0.575	0.163	0.263
9	0.675	0.138	0.188
10	0.633	0.150	0.217
11	0.650	0.142	0.208
12	0.613	0.156	0.231

(\*)Mezcla patrón (sin vidrio)

## 2.2 Caracterización de la materia prima

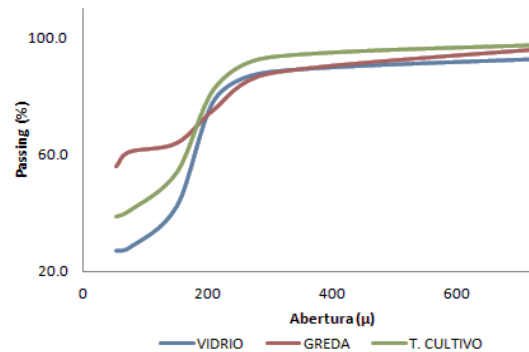
Se determinaron las propiedades físicas como el análisis granulométrico (Figura 2), porcentaje de humedad, límite de Atterberg y densidad y mineralógico por Difracción de Rayos X (DRX).



**Figura 1.** Región experimental de mezclas de las materias primas presentada en un diagrama ternario.

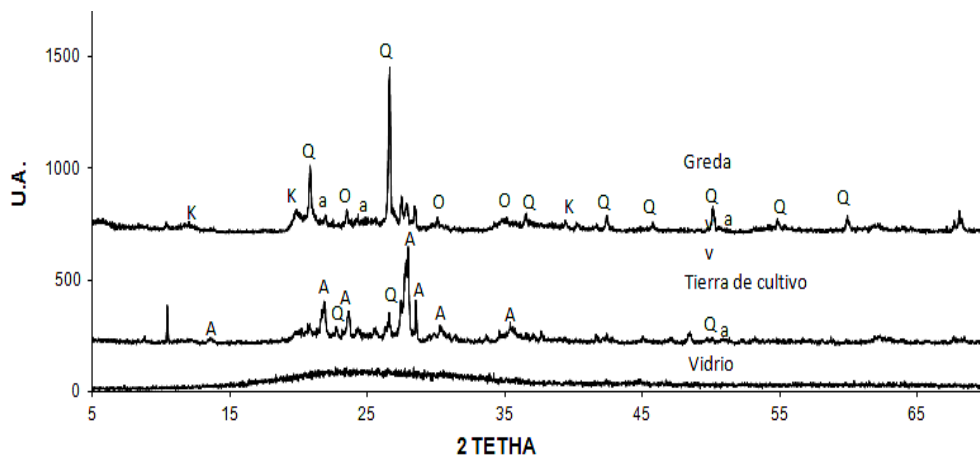
El análisis granulométrico nos muestra que gran parte de las partículas finas están constituidas por greda y tierra de cultivo, mientras que el vidrio participa en menos cantidad, la difracción de rayos X nos

permite identificar al cuarzo la caolinita la albita y la anortita como los principales componentes de la greda y la tierra de cultivo, el vidrio reporta una constitución totalmente amorfa como era de esperarse (ver Figura 3).



**Figura. 2.** Análisis granulométrico de las materias primas.

Obtenida la caracterización de la materia prima se procedió a la fabricación experimental de los ladrillos siguiendo los parámetros de la técnica artesanal, para lo cual se mezclaron las materias primas con agua y se amasó hasta obtener la pasta adecuada para el moldeo, se utilizó un molde metálico de 5.32 x 5.32 x 5.32 cm, se fabricaron 13 bloques de ladrillos de arcilla cocida en cada bloque con sus respectivas replicas en los cuales se evaluaron las características físicas en crudo y en seco.



**Figura 3.** DRX comparativos de las Materias Primas donde a es albita, A es anortita, K caolinita y Q cuarzo.

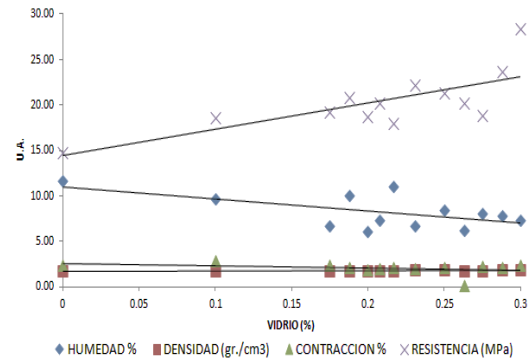
Luego de secar las muestras se llevaron a la mufla a 900 °C por 5 horas, se realizaron ensayos físicos obteniéndose para la mezcla 503020 la máxima resistencia a la compresión de 28 MPa; posteriormente, se

fabricaron tres bloques con tres repeticiones de igual mezcla (502030) las que se llevaron a cocción a diferentes temperaturas 750, 800, 850 y 900 °C, se realizaron análisis granulométrico por microscopia de luz,

Difracción de Rayos X para la caracterización mineralógica y Fluorescencia de Rayos X para el análisis elemental.

### 3. Resultados y Discusiones

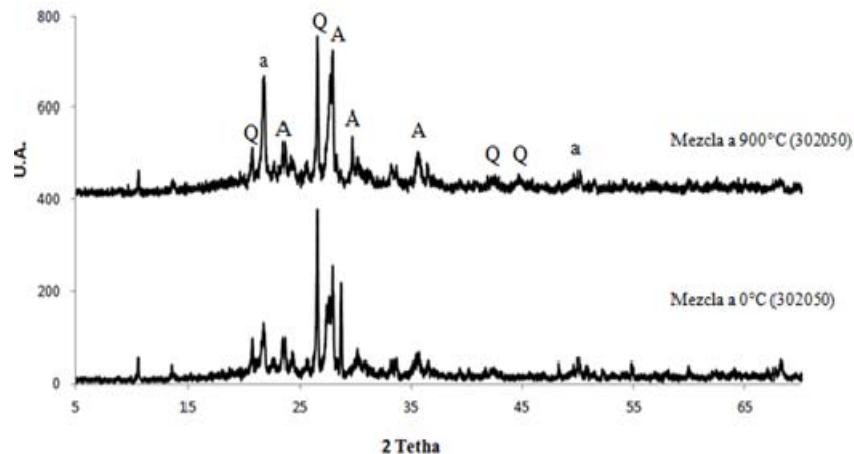
Podemos señalar que los mejores resultados se obtuvieron usando vidrio sodo-cálcico reciclado, como reforzante en la elaboración de ladrillos de arcilla cocida con 30 % en peso de vidrio sodo-cálcico, 20 % de greda y 50 % de tierra de cultivo, cocidos a una temperatura de 900 °C, se tuvieron parámetros de 28 MPa como se aprecia en la Figura 4 y a una temperatura de 800 °C la resistencia a la compresión llega hasta de 17 MPa; comparativamente Vorrada *et al.* obtuvieron que con adiciones de vidrio menores al 30% en peso y temperatura de quemado de 1100 °C tuvieron resultados de resistencia a la compresión de 16 a 41 MPa [4], por lo que hay concordancia en las dos investigaciones ya que los resultados son similares, lo que genera la confianza para utilizar el vidrio reciclado sodo-cálcico como un componente reforzante en la industria ladrillera.



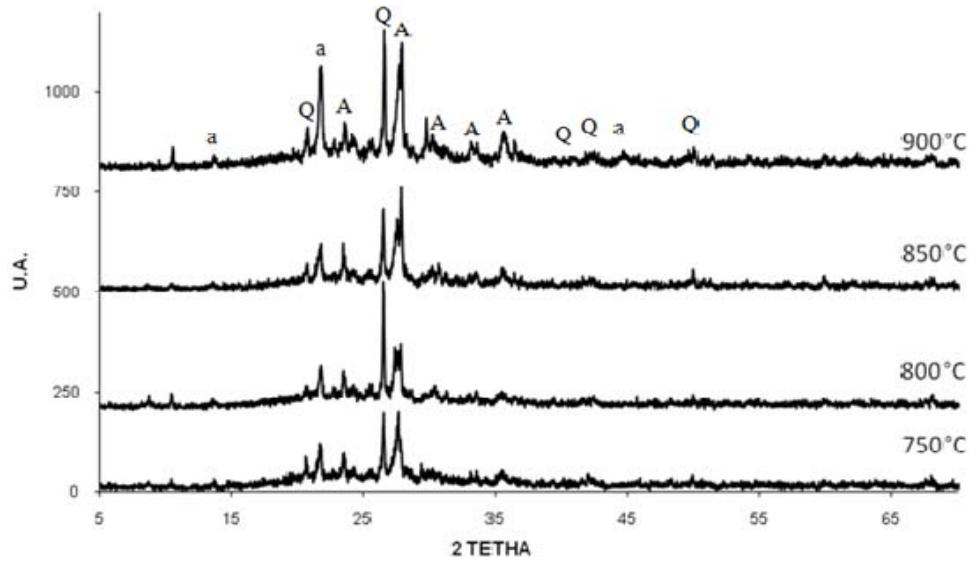
**Figura 4.** Relación de propiedades físicas con el porcentaje de vidrio.

A medida que aumenta las proporciones de partículas de vidrio se aprecia un incremento de la densidad lo que incrementa la resistencia a la compresión.

La mezcla (302050) al ser sometido a temperatura de cocción de 900 °C muestra un incremento en la cristalinidad de los picos de albita y anortita como puede apreciarse en la Figura 5, del mismo modo pero con más detalle, se aprecia el cambio de la cristalinidad de los diferentes componentes cristalinos sometidos a 750, 800, 850 y 900 °C de temperatura (Figura 6).

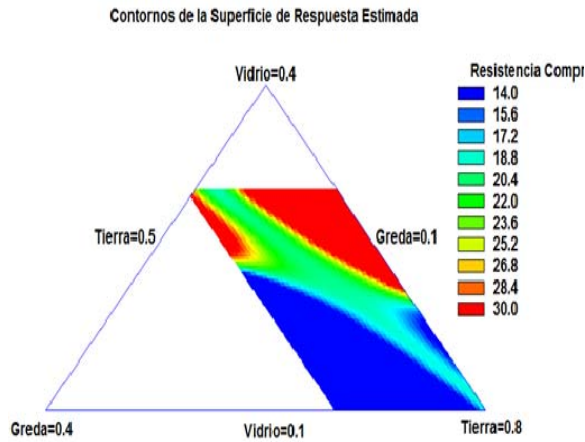


**Figura 5.** DRX de comparación de dos muestras cocidas a 900 °C con vidrio y sin vidrio, albita (a), anortita (A) y cuarzo(Q).



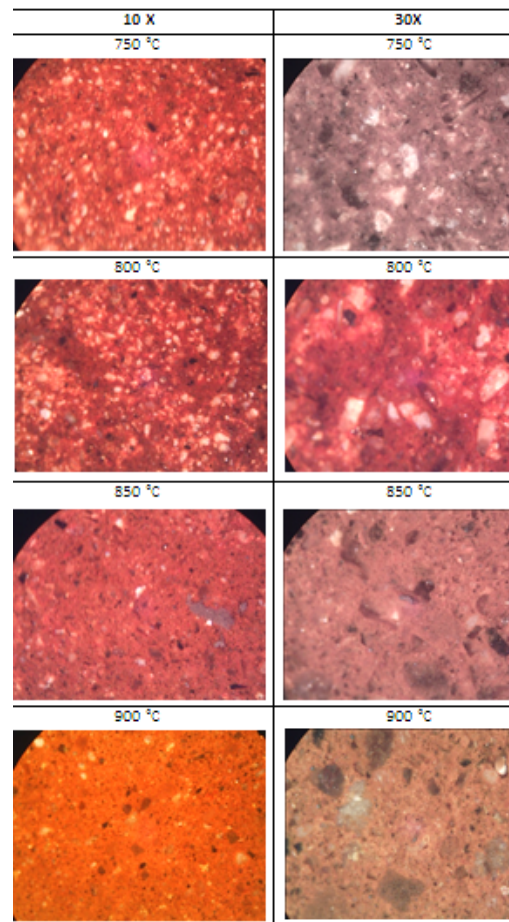
**Figura 6.** Difractogramas secuenciales de DRX de muestras cocidas con vidrio a diferentes temperaturas, donde albita(a), anortita (A) y cuarzo (Q).

Se analizaron los resultados con el software Statgraphics en el que se pudo determinar teóricamente valores optimizados los que se pueden ver en la Figura 7, los mismos que están muy próximos a los parámetros de la muestra (302050).



**Figura 7.** Contornos de superficie de respuesta estimada.

En la Figura 8 se puede observar las microfografías obtenidas por microscopia de luz a 10 y 30 aumentos y se aprecia que a medida que se incrementa la temperatura la granuladitud se hace más uniforme.



**Figura 8.** Microfotografías de Microscopia Óptica de las muestras 305020 a 10 y 30 aumentos y a diferentes temperaturas de calcinación.

#### 4. Conclusiones

Es posible fabricar ladrillos de arcilla cocida con buenas propiedades mecánicas utilizando como reforzante al vidrio sodo-calcico reciclado en una proporción de 30 % en peso, 50 % tierra de cultivo y 20 % de greda, cocido a 900 °C. Se determinó la resistencia a la compresión de 28 MPa. Como agente fundente en la misma mezcla con una temperatura de cocción de 800 °C se obtuvo una resistencia a la compresión de 17 MPa, que según la norma de Albañilería E-007 sería catalogado como ladrillo tipo V con mejor resistencia a la compresión.

De acuerdo con los resultados, el porcentaje óptimo de vidrio sodo-calcico es de 30 % en peso, la resistencia máxima obtenida utilizando vidrio sodo-calcico es de 28 MPa a 900 °C y la temperatura mínima para la cocción de ladrillos de arcilla cocida es de 800 °C manteniendo una resistencia a la compresión de 17 MPa.

#### 5. Bibliografía

- [1]. Ministerio de la Producción, PRODUCE (2012, 14 de enero), Índice de Crecimiento Industrial 2011, Estadística MYPE e Industria.
- [2]. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, (2006). Norma Técnica E.070 Albañilería, Resolución Ministerial N° 011-2006-Vivienda.
- [3]. Lawson J, Madrigal J, Erjavec J. (1992) Estrategias experimentales para el mejoramiento de la calidad en la industria. (1ra. ed.) México, Grupo Editorial Iberoamericano.
- [4]. Vorrada L, Thanapa P, Kayarat K, Chatnarong S. (2009). Effects of recycled glass substitution the physical and mechanical properties of clay bricks. Journal Science Direct Waste Management. 29(09): 2717-2721.