

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS DE
BASE ARCILLA CON LA INCORPORACIÓN DE SUSTANCIAS
RECUPERADAS DE BATERÍAS DOMÉSTICAS

SANDRA MILENA USMA QUINTERO

CARLOS DANIEL CLAVIJO GRANADOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS DE
BASE ARCILLA CON LA INCORPORACIÓN DE SUSTANCIAS
RECUPERADAS DE BATERÍAS DOMÉSTICAS

SANDRA MILENA USMA QUINTERO

CARLOS DANIEL CLAVIJO GRANADOS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO

DIRECTOR

PROFESOR PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

Dr. CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por guiarnos a lo largo de estos años, formarnos con valores y alta calidad académica.

Al profesor Pedro Delvasto, director de este proyecto por confiar en nosotros, darnos su disposición, conocimiento y apoyo.

A los técnicos Ambrosio Carrillo, Javier Gaitán y Domingo por toda su colaboración en los laboratorios para el desarrollo de este proyecto.

A la empresa ERGOS por proporcionar la materia prima principal utilizada en el desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	15
1. ANTECEDENTES.....	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.1 DEFINICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	19
3.1.1 Arcilla.....	19
3.1.2 Chamota	20
3.1.3 Residuo	20
3.1.4 Frita	20
3.2 ELABORACIÓN DE FRITAS	20
3.3 FORMULACIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS.....	21
3.4 FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS.....	22
3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA.....	24
3.5.1 Ensayo de compresión	25
3.5.2 Ensayo de absorción de agua.....	25
3.5.2.1 Ensayo de absorción de agua a temperatura ambiente	25
3.5.2.2 Ensayo de absorción de agua por ebullición	26

3.5.3 Prueba de estabilidad química de los ladrillos al contacto con agua destilada	26
3.5.4 Prueba de análisis de partícula	26
3.5.5 Prueba de FTIR	27
3.5.6 Eflorescencia	27
3.6 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA EN MINITAB 17	27
4. RESULTADOS	28
4.1 ASPECTO VISUAL DEL PRODUCTO	28
4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	28
4.3 ABSORCIÓN DE AGUA	29
4.3.1 Absorción de agua a temperatura ambiente	29
4.3.2 Absorción de agua por ebullición	30
4.4 PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LADRILLOS AL CONTACTO CON AGUA DESTILADA.....	30
4.5 EFLORESCENCIA	31
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
6. CONCLUSIONES	36
CITAS BIBLIOGRAFICAS	37
BIBLIOGRAFÍA.....	40
ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Cantidades utilizadas para la fabricación de fritas en 100 g.....	21
Tabla 2. Mezclas formuladas para la fabricación de ladrillos por cada 1000g.....	22
Tabla 3. Propiedades obtenidas de ladrillos con diferentes tipos de residuos.....	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema general del procedimiento experimental.....	19
Figura 2. Fabricación de fritas a) mezcla de materias primas, b) ingreso del crisol al horno y c) colado	21
Figura 3. Fritas de las composiciones de la tabla 1. A) F1, b) F2 y c) F3.....	21
Figura 4. A) geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo a. B) geometría del ladrillo tipo a.	23
Figura 5. A) geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo b. B) geometría del ladrillo tipo b.	23
Figura 6. Esquematzación de la curva de sinterización de los ladrillos.	24
Figura 7. Aspecto visual del producto terminado.	28
Figura 8. Resultados promedio del ensayo de compresión para las dos formas de adición del residuo.....	29
Figura 9. Resultados del ensayo de absorción de agua a temperatura ambiente para las dos formas de adición del residuo.	29
Figura 10. Resultados del ensayo de absorción de agua por ebullición para las dos formas de adición del residuo.	30
Figura 11. Resultados de la medición de ph para las dos formas de adición del residuo.....	31
Figura 12. Resultados de la medición de conductividad para las dos formas de adición del residuo.....	31

Figura 13. Ladrillos después de la prueba de eflorescencia (20 días) a) vista general b) precipitados en detalle.32

Figura 14. Pruebas de dunnett a) compresión y b) absorción de agua.34

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS	45
ANEXO B. PRUEBA DE COMPRESIÓN	46
ANEXO C. PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA.....	47
ANEXO D. PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LADRILLOS AL CONTACTO CON AGUA DESTILADA	48
ANEXO E. PRUEBA DE PLASTICIDAD	49
ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	50
ANEXO G. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	51

RESUMEN

TÍTULO: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS DE BASE ARCILLA CON LA INCORPORACIÓN DE SUSTANCIAS RECUPERADAS DE BATERÍAS DOMÉSTICAS.*

AUTORES: Usma Quintero, Sandra Milena** Clavijo Granados, Carlos Daniel**

PALABRAS CLAVES: Ladrillos, Cátodo baterías alcalinas, Valorización de residuos, Arcilla, Fritas.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se utilizó el residuo proveniente del cátodo de baterías alcalinas ($Zn-MnO_2$), con el fin de inmovilizar este tipo de residuo en una matriz de arcilla sinterizada, a la par que se obtiene un material de construcción útil tipo ladrillo. El residuo está compuesto en su mayoría por manganeso (51%). Se establecieron tres cantidades de adición de residuo con base en el porcentaje de manganeso que este posee y para cada una de estas se adicionó el residuo de dos formas: sin vitrificar, es decir, directamente como se extrae de la batería y vitrificado, es decir, incorporado a una matriz vítrea, bajo la forma de frita. Para la fabricación de los ladrillos, cada una de las mezclas fue preparada, conformada manualmente y sinterizada a $950^{\circ}C$. Para la evaluación del producto obtenido, se realizaron pruebas de compresión, absorción de agua, estabilidad química de los ladrillos al contacto con agua destilada y eflorescencia. A partir de los resultados obtenidos se determinó la posibilidad del uso de este residuo para la fabricación de ladrillos, manteniendo las propiedades de un ladrillo tradicional, adicional a esto, se obtuvo un producto con coloraciones diferentes a la tradicional el cual para todas las composiciones cumple con la prueba de eflorescencia y absorción de agua bajo la norma NTC 4205-2 para ladrillos de base arcilla no estructurales.

*Proyecto de grado, modalidad investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita.

ABSTRACT

TITLE: FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CLAY BASED CERAMIC MATERIALS WITH THE INCORPORATION OF SUBSTANCES RECOVERED FROM DOMESTIC BATTERIES.*

AUTHORS: Clavijo Granados, Carlos Daniel** Usma Quintero, Sandra Milena**

KEYWORDS: Bricks, Alkaline battery cathode, Residue valorization, Clay, Frits.

DESCRIPTION: In this work, the residue from the cathode of alkaline batteries (Zn-MnO₂) was used, with the final purpose of immobilize this residue in a sintered clay structure, while a useful construction material as a brick is obtained. The residue is mostly compound of manganese (51%) and oxygen. Three addition quantities of residue were established according to the manganese percentage of the residue and for each one of them, the residue was added in two different ways: without vitrification, that is, directly as it is taken from the battery and vitrified, that is, incorporated in a glass structure, in the form of a frit. For the brick's fabrication, each one of the mixtures were prepared, manually shaped and sintered at 950°C. For the evaluation of the final product, compression testing, water absorption, chemical stability by the contact of bricks with distilled water at room temperature and efflorescence. From the results obtained the possibility of using this residue for the brick's fabrication was determined, maintaining the properties of a traditional brick, in addition, different product colorations were obtained in comparison to the traditional brick, all the compositions accomplish the efflorescence and water absorption testing according to the NTC 4205-2 for non-structural clay based bricks.

*Proyecto de grado, modalidad investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita.

INTRODUCCIÓN

La crisis ambiental actual sumada a la escasez de algunos recursos naturales ha impulsado el uso de materiales reciclados como materias primas. Para el caso de dispositivos eléctricos y electrónicos, su periodo de vida útil no es prolongado en comparación a otros por lo que diariamente se desechan toneladas de estos, entre los cuales se encuentra una amplia variedad de sustancias metálicas, vítreas e inclusive poliméricas. Algunos residuos tienen un impacto más severo en el ambiente por la falta de técnicas o estrategias para la disposición de estos.

Entre los esfuerzos ingenieriles por controlar este tipo de residuos se encuentra la técnica de vitrificación que como su nombre lo indica, consiste en la incorporación del residuo a un vidrio estable, lo que lo cataloga como un procedimiento seguro para tratar residuos no combustibles y además disminuye la huella de carbono para la fabricación de algunos productos [1-3].

Adicionalmente, la valorización de residuos juega un papel importante teniendo en cuenta que la viabilidad de la implementación de técnicas para tratar estos residuos está regida principalmente por el factor económico, lo que se considera comúnmente como un residuo puede ser visto como materia prima para un nuevo proceso productivo, con esto se favorece al medio ambiente y se pueden producir ganancias. Este proceso implica la clasificación, recuperación y reutilización de estos [4]. La excesiva extracción de arcilla ha generado un agotamiento de este recurso virgen, por lo tanto, se ha impulsado el desarrollo de alternativas en la producción de ladrillos a partir de residuos, reduciendo la contaminación ambiental y contribuyendo a la sostenibilidad [5].

Partiendo de esto, en este trabajo se evaluará el efecto de la adición óxidos metálicos y de fritas a materiales de base arcilla con el fin de encontrar una posible aplicación para este tipo de residuos.

1. ANTECEDENTES

Entre los intentos por incorporar diferentes residuos a los ladrillos se han observado ejemplos como colillas de cigarrillo [6], escoria de procesos de soldadura [7], arena de moldes de fundición [8], cenizas de bagazos de caña de azúcar [9], residuos industriales y agrícolas [10], vidrios de paredes estructurales [11], lodos de plantas de tratamiento de aguas [12] y residuos de la industria del papel [13]. Donde cada uno de estos residuos no se añadió de manera aleatoria con el fin de representar volumen, sino por el contrario, fueron seleccionados estratégicamente por su composición química y/o características físicas, las cuales lo hacen idóneo para reemplazar parcial o completamente algunas de las materias primas utilizadas en los ladrillos tradicionales.

Partiendo de esta idea, Aeslin [6], Alonso [8], Faria [9] y Martínez [12] utilizaron cenizas de diferentes elementos orgánicos o residuos de arena de procesos industriales que por su alto contenido en sílice se asemejan a las características propias de la arcilla, sin embargo, ninguno de estos pretendió reemplazar completamente la arcilla. Entre los resultados obtenidos, las colillas de cigarrillo disminuyeron la densidad del ladrillo, las arenas de moldes de fundición se adicionaron de acuerdo a su proveniencia del núcleo o el cuerpo de molde por el cambio en sus propiedades al contacto con el metal fundido, las cenizas de bagazo de caña de azúcar aumentaron la absorción de agua, los lodos de las plantas de tratamiento de agua aumentaron la porosidad del ladrillo y aunque se añadió hasta un 15% en peso, los resultados fueron favorables únicamente hasta un 5%.

Por otra parte, Caroline [8] y Vorrada [11] adicionaron sustancias cuyo objetivo era reemplazar parcialmente los fundentes, pues se trata básicamente de sustancias que ayudarán a formar las fases vítreas durante el proceso de sinterización. Además, Raut [10] utilizó diferentes residuos industriales y agrícolas, entre sus múltiples resultados se puede destacar la producción de ladrillos mediante prensado, eliminando la etapa de sinterización lo cual representa un ahorro

energético que a su vez es un beneficio económico. Es importante resaltar que en todos los casos anteriores las propiedades mecánicas fueron un parámetro fundamental para la determinación de la viabilidad de implementar estos residuos y en todos los casos se cumplieron para unos determinados porcentajes de adición.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Fabricar y caracterizar bajo norma, materiales cerámicos arcillosos que incorporen óxidos metálicos recuperados a partir de baterías domésticas desechadas.

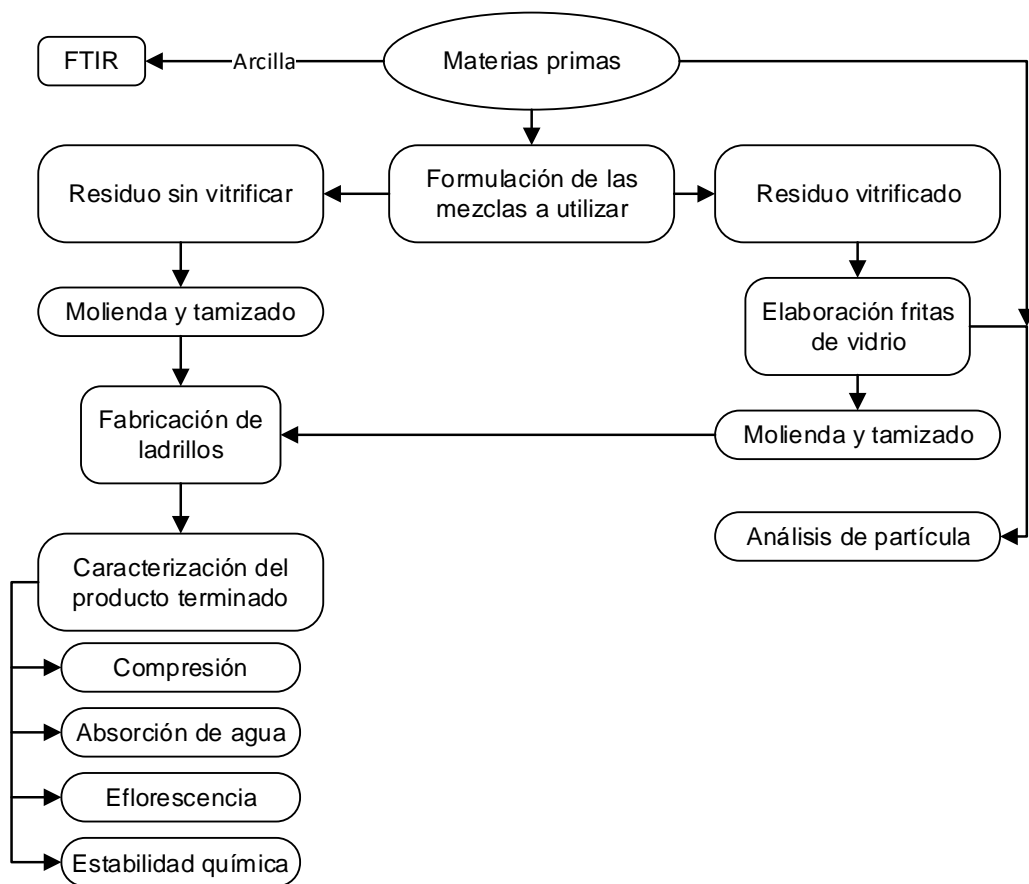
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto sobre las propiedades (mecánicas y químicas) de la incorporación directa de óxidos metálicos recuperados a partir de baterías domésticas desechadas.
- Evaluar el efecto sobre las propiedades (mecánicas y químicas) de la incorporación de óxidos metálicos bajo la forma de una frita.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proceso experimental se dividió en varias etapas: definición de materia primas, elaboración de las fritas, formulación de las mezclas de materias primas, fabricación de ladrillos y evaluación del producto terminado mediante ensayos mecánicos, de absorción de agua, eflorescencia y estabilidad química. Los pasos desarrollados en el proyecto se describen en la figura 1.

Figura 1. Esquema general del procedimiento experimental.



3.1 DEFINICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.1.1 Arcilla La materia prima principalmente utilizada para la fabricación de ladrillos es la arcilla, que es una roca sedimentaria compuesta por minerales aluminosilicatos con la propiedad de adquirir plasticidad al mezclarse con agua y

formar una pasta que al conformarse y secarse mantiene su forma, adquiriendo resistencia y dureza cuando se somete a un proceso de sinterización [14].

3.1.2 Chamota Se denomina de esta manera a la arcilla calcinada o sometida a un proceso de sinterización. La chamota tiene un alto contenido de sílice y alúmina, se obtiene a partir de ladrillos triturados [15].

3.1.3 Residuo El residuo utilizado proviene del cátodo de baterías alcalinas (Zn-MnO₂), el cual contiene Mn (51%). Por tratarse de un óxido, el otro elemento mayoritario que contiene este residuo es O (30,75), también hay presencia minoritaria de otros elementos tales como C (6,5%), S (0,9%), K (9,4%), Zn (1,4%) y Fe (0,04%) [16].

3.1.4 Frita Es un material vitrificado obtenido a partir de una mezcla de carbonatos y silicatos que son fundidos y enfriados en agua [17].

3.2 ELABORACIÓN DE FRITAS

Para la fabricación de las fritas se utilizaron botellas de vidrio transparentes (cullet), carbonato de litio, bórax y residuo rico en manganeso obtenido en proyectos anteriores [1]. El vidrio reciclado fue triturado en una trituradora de mandíbulas y molido en un molino de bolas hasta lograr un tamaño de partícula pasante malla Tyler 100. El residuo se introdujo en una estufa a 100°C para eliminar su humedad y ser molturado en un mortero manual hasta lograr el mismo tamaño que el vidrio reciclado. El bórax y carbonato de litio se homogenizaron con el vidrio y el residuo. Posteriormente, las mezclas con las cantidades mencionadas en la tabla 1 se introdujeron individualmente en un crisol (figura 2a) y se ingresaron en una mufla a 1050 °C (figura 2b). Una vez completada la fusión, se vertió el contenido del crisol en un recipiente lleno de agua con una lámina de

acero inoxidable en el fondo (figura 2c), obteniendo así las fritas como se observa en la figura 3.

Figura 2. Fabricación de fritas a) mezcla de materias primas, b) ingreso del crisol al horno y c) colado.



Figura 3. Fritas de las composiciones de la tabla 1. a) F1, b) F2 y c) F3.



Tabla 1. Cantidades utilizadas para la fabricación de fritas en 100 g.

Tipo de Frita	Residuo [g]	Cullet [g]	Bórax [g]	Carbonato de Litio [g]
F1	0	69,5	30	0,5
F2	1,96	68,14	29,41	0,49
F3	33,3	46,3	20	0,3

Las fritas presentadas en la tabla 1 fueron diseñadas para garantizar que la única variable en la mezcla de los ladrillos sea la cantidad de residuo.

3.3 FORMULACIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS

Para la fabricación de los ladrillos, se fijó el valor de la chamota con el fin de limitar el número de variables para determinar de manera acertada el efecto de las

mismas, por otra parte, el residuo se adicionó de dos formas diferentes, vitrificado (frita) o sin vitrificar (residuo directo). El contenido de residuo adicionado estuvo limitado por la fase vítrea, teniendo en cuenta que en trabajos anteriores [1] para cantidades mayores se obtuvo un vidrio de poca fluidez, adicionalmente, Pabón y Cala [18] determinaron que para cantidades superiores al 20% en peso de fase vítrea las propiedades mecánicas disminuyen. Con esto, se formularon las mezclas presentadas en la tabla 2 para la fabricación de los ladrillos, donde la composición de 0% de Mn sin vitrificar representa el ladrillo base (usado tradicionalmente).

Tabla 2. Mezclas formuladas para la fabricación de ladrillos por cada 1000g.

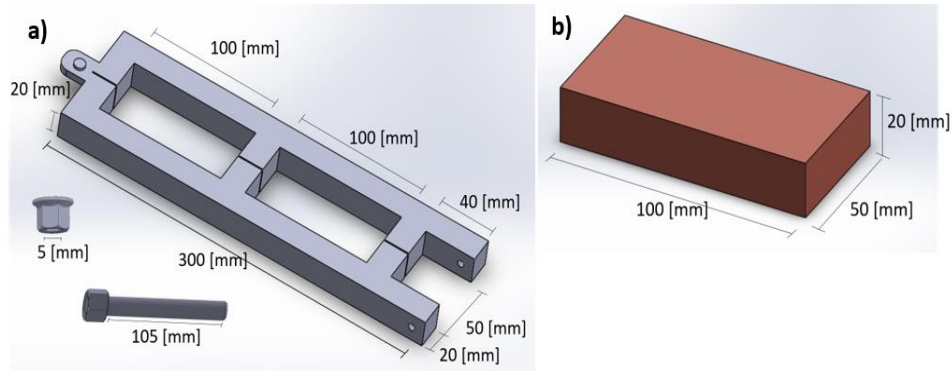
Forma de adición del residuo	% Mn	Residuo [g]	Arcilla [g]	Chamota [g]	Frita [g] (Tipo de frita)
Sin Vitrificar	0	0	800	200	0
	0.1	2	798	200	0
	2.5	50	750	200	0
Vitrificado	0	0	700	200	100 (F1)
	0.1	0	698	200	102 (F2)
	2.5	0	650	200	150 (F3)

3.4 FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS

Para garantizar que la granulometría no fuera un factor que afectara las propiedades de los ladrillos, todas las materias primas fueron llevadas a un tamaño de partícula pasante malla Tyler 50 lo cual se evaluó mediante una prueba de análisis granulométrico cuyos resultados se encuentran en la figura F1 del anexo F. En el caso de la arcilla, el residuo y las fritas fue necesario eliminar la humedad en una estufa a 100 °C para facilitar el proceso de molienda. Para moler la arcilla y la chamota se utilizó un molino de bolas, mientras que para las fritas y el residuo un mortero automático RETSCH RM 200. Una vez obtenido el tamaño de partícula deseado, se mezclaron las materias primas con las proporciones mencionadas en la tabla 2 y se homogeneizaron hasta observar un único color en la mezcla. Para determinar la cantidad de agua necesaria para la preparación de

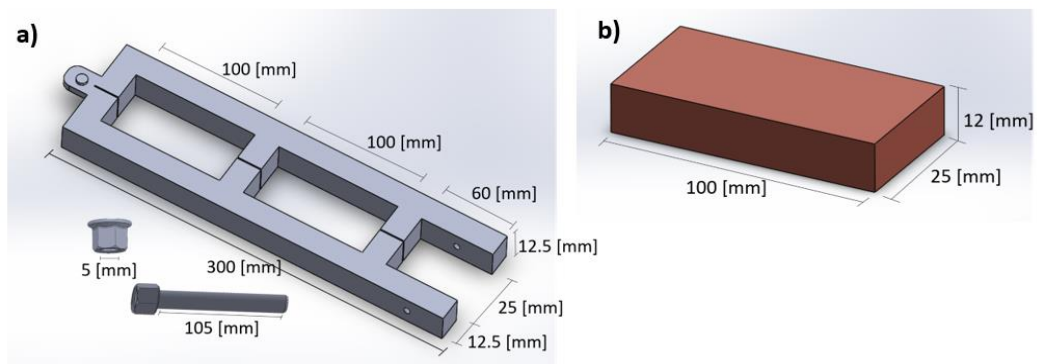
la mezcla se tomó una muestra representativa de 50 g y se halló el límite plástico de acuerdo con la norma ASTM D4318-17 [19] tal como se presenta en el anexo E. Seguido a esto, se prepararon las pastas cerámicas para continuar con el proceso de conformado. Los moldes utilizados fueron los fabricados por Pabón y Cala [18] en un proyecto anterior, los cuales están diseñados conforme a las geometrías descritas en las normas ASTM C20-00 [20] y ASTM C674-13 [21] como se muestra en la figura 4.

Figura 4. a) Geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo A. b) Geometría del ladrillo tipo A.



Fuente: PABON, F y CALA, Y. Producción de cerámicas tradicionales basadas en arcillas, que incorporan sustancias vítreas recuperadas de la basura electrónica.

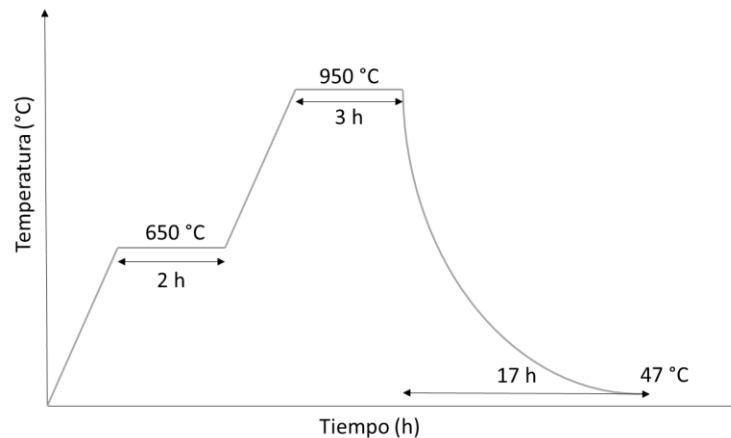
Figura 5. a) Geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo B. b) Geometría del ladrillo tipo B.



Fuente: PABON, F y CALA, Y. Producción de cerámicas tradicionales basadas en arcillas, que incorporan sustancias vítreas recuperadas de la basura electrónica.

En el proceso de conformado se utilizó una placa base de vidrio y se lubricó al igual que los moldes con aceite mineral para facilitar el desmolde del ladrillo (ver anexo A, figura A1). El conformado se realizó por apisonado manual y por capas. Una vez finalizada la etapa de conformado, se secaron los ladrillos a temperatura ambiente durante tres días. Posteriormente, se ingresaron en una estufa por 24 horas para proceder con la etapa de sinterización. Se realizaron pruebas a 850, 900, 950 y 1050 °C para determinar la temperatura de sinterización óptima de los ladrillos, los resultados de esta prueba preliminar se presentan en el anexo A, figura A2. Una vez seleccionada la temperatura óptima (950 °C) se realizó la sinterización de manera escalonada como se presenta en la figura 6. Al finalizar la etapa de sinterización, se apagó el horno y se dejó enfriar con las probetas en su interior.

Figura 6. Esquematación de la curva de sinterización de los ladrillos.



3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

Los ensayos de caracterización física y mecánica se realizaron con base en el procedimiento establecido por la norma NTC 4017 [22] y se evaluaron de acuerdo a los parámetros establecidos en la norma NTC 4205-2 [23]. El diseño de experimentos se realizó con la ayuda del software Minitab 17.

3.5.1 Ensayo de compresión Esta prueba se realizó utilizando una máquina universal de ensayos SHIMADZU AG-XPLUS 25KL. Se ubicaron las probetas de geometría tipo A de manera vertical tal como se muestra en la figura B1 del anexo B. Se utilizaron 3 probetas de sacrificio para determinar la velocidad de desplazamiento óptima y así cumplir con las especificaciones de la norma NTC 4017 [22], estableciendo una velocidad de 0,5 mm/min y una carga máxima de 50 kN en el software del equipo. Fueron ensayadas ocho probetas de cada una de las composiciones establecidas en la tabla 2. Se calculó la resistencia máxima a la compresión basados en la ecuación (1) establecida por la norma [22].

$$C = \frac{W}{A} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde C es la Resistencia del espécimen a la compresión en MPa, W es la carga máxima (de rotura) [N] (indicada por la máquina de ensayo) y A el promedio de las áreas brutas de las superficies superior e inferior del espécimen [mm²].

3.5.2 Ensayo de absorción de agua En el anexo C se encuentra un registro fotográfico de este procedimiento junto con la tabla completa de resultados.

3.5.2.1 Ensayo de absorción de agua a temperatura ambiente Para esta prueba se evaluaron 5 probetas de geometría tipo B por cada una de las composiciones establecidas en la tabla 2. Inicialmente, se pesaron las probetas secas de manera individual, se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 24 horas. Una vez transcurridas las 24 horas se sacaron individualmente las probetas inmersas, se removió el exceso de agua con un paño húmedo y se registró su peso. El porcentaje de absorción de agua se calculó mediante la ecuación (2) obtenida de la norma NTC 4017[22].

$$\text{Absorción, \%} = 100x \frac{W_{SS} - W_S}{W_S} \quad \text{Ecuación (2)}.$$

Donde W_{ss} es la masa saturada del espécimen después de la inmersión en agua [g] y W_s la masa del espécimen seco [g].

3.5.2.2 Ensayo de absorción de agua por ebullición Para esta prueba se utilizaron las probetas saturadas provenientes del ensayo de absorción de agua, estas se sumergieron en una bandeja metálica con agua a temperatura ambiente, se elevó la temperatura con ayuda de una plancha de calentamiento hasta alcanzar la temperatura de ebullición. Al alcanzarse la temperatura de ebullición se contabilizó una hora y se apagó la plancha de calentamiento, una vez alcanzada la temperatura ambiente se retiró el exceso de agua con un paño húmedo y se registró su peso. El cálculo se realizó teniendo en cuenta la ecuación (3) descrita en la norma NTC 4017[22].

$$\text{Absorción, \%} = 100 \times \frac{W_b - W_s}{W_s} \quad \text{Ecuación (3).}$$

Donde W_b es la masa saturada del espécimen después de la inmersión en agua en ebullición [g] y W_s la masa del espécimen seco [g].

3.5.3 Prueba de estabilidad química de los ladrillos al contacto con agua destilada Para esta prueba se molieron ladrillos correspondientes a cada composición en un mortero automático RETSCH RM 200 hasta alcanzar un tamaño de partícula pasante 50 malla Tyler y se evaluó su estabilidad química a temperatura ambiente en agua destilada, manteniendo el sistema en agitación con un agitador magnético a una velocidad de 700 rpm. A los 60 minutos de transcurrida la prueba se dejó decantar el sólido y se tomaron valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{s/cm}$) al líquido sobrenadante con un equipo Thermo Scientific Orion A221 y de pH en un equipo HACH sensION+. En el anexo D se encuentran las tablas completas de los resultados de la prueba.

3.5.4 Prueba de análisis de partícula En esta prueba se evaluaron cada una de las materias primas utilizadas en la fabricación de los ladrillos con su respectiva

granulometría en medio líquido utilizando un equipo MASTERSIZER Malvern Hydro EV, los resultados se pueden observar en la figura F1 del anexo F.

3.5.5 Prueba de FTIR Para esta prueba se molió la arcilla hasta un tamaño de partícula pasante 200 malla Tyler con un molino RESTCH RM 200 y se utilizó el equipo Cary 630 FTIR para caracterizar esta materia prima.

3.5.6 Eflorescencia Para esta prueba se realizó una adaptación de la norma NTC 4017. Se introdujo un ladrillo de cada una de las composiciones en un recipiente de polipropileno con agua, se cerró herméticamente y se dejó expuesto a la intemperie durante 20 días y se registró el resultado.

3.6 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA EN MINITAB 17

Una vez diseñadas las mezclas a utilizar, se definieron dos factores (Vitrificado y Sin vitrificar) y tres niveles (0, 0.1 y 2.5% Mn) con los cuales se realizó un diseño de experimentos, el cual indica el orden en el que se deben realizar los experimentos con el fin de aleatorizar los resultados. La ruta de comandos utilizada para esto fue:

STAT => DOE => Factorial => Create Factorial Design

Se completaron las tablas de cada uno de los diseños experimentales con los resultados de las respectivas pruebas (compresión, absorción de agua y estabilidad química) y se analizaron individualmente (ver anexo G) bajo el siguiente comando:

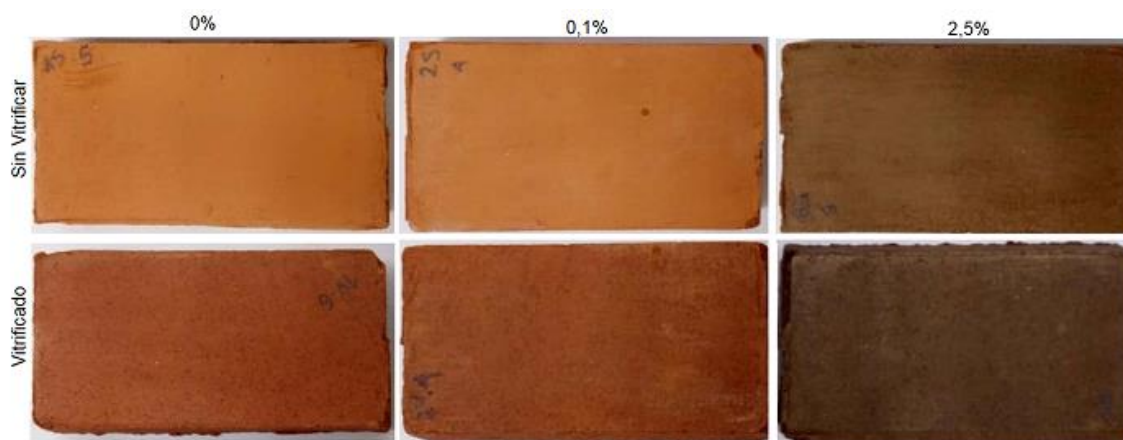
STAT => DOE => Factorial => Analyze Factorial Desing

4. RESULTADOS

4.1 ASPECTO VISUAL DEL PRODUCTO

En la figura 7 se observa que el producto obtenido después de la sinterización presenta un cambio de coloración con respecto al contenido de Mn y a la forma de adición del residuo, siendo este más evidente en el paso de 0,1 a 2,5% de Mn para ambas formas de adición.

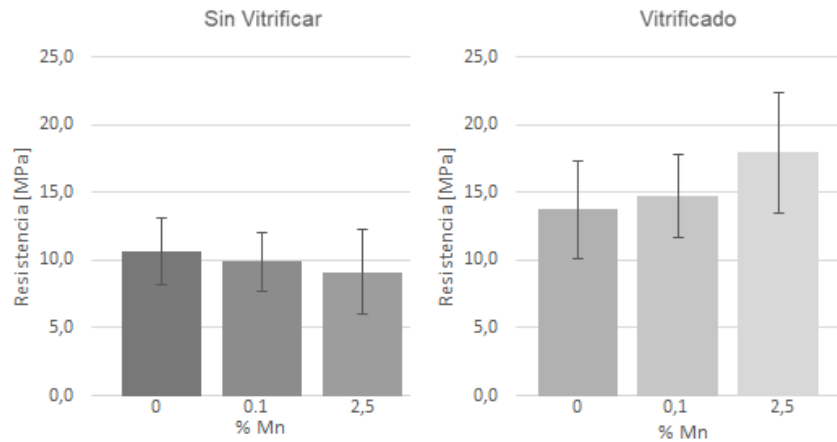
Figura 7. Aspecto visual del producto terminado.



4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

En la figura 8 se muestra que para la adición sin vitrificar existe una relación inversa entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de manganeso, mientras que para la vitrificada la relación es directa. Es evidente el aumento de la resistencia de los ladrillos con la adición del residuo vitrificado en comparación a los del residuo sin vitrificar. Teniendo en cuenta la norma bajo la que se evaluaron los ladrillos [23], sólo las composiciones con 0,1 y 2,5% de Mn vitrificado cumplen con los requisitos de un ladrillo utilizado como unidad no estructural. El análisis de estos resultados se describe con mayor detalle en el capítulo 5.

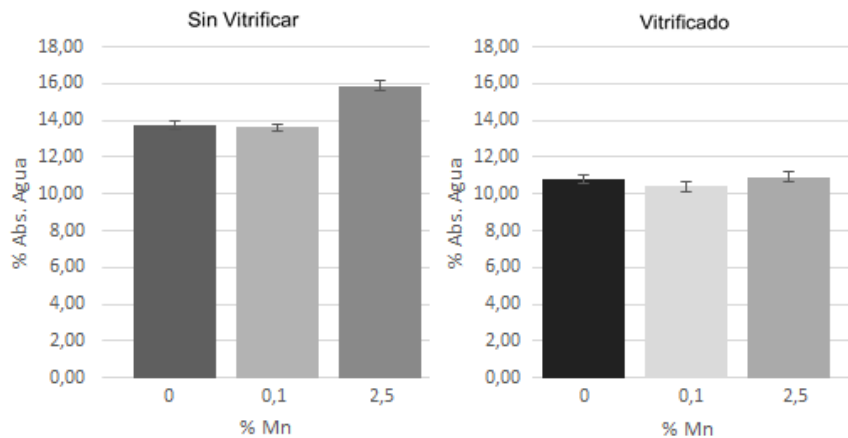
Figura 8. Resultados promedio del ensayo de compresión para las dos formas de adición del residuo.



4.3 ABSORCIÓN DE AGUA

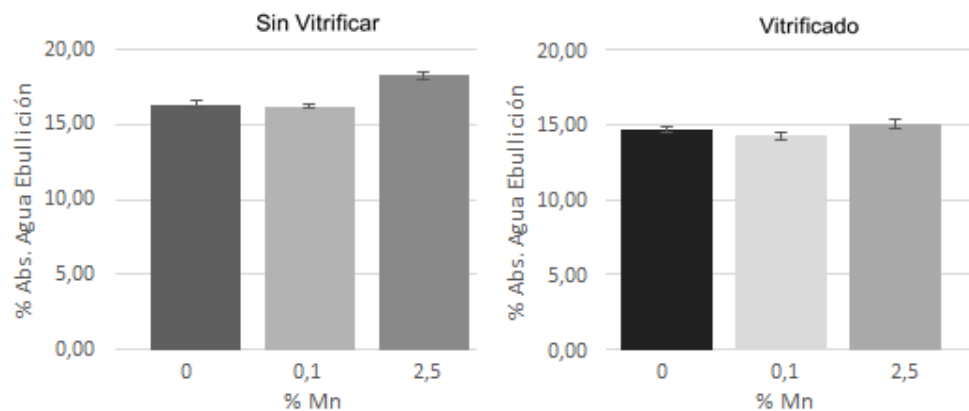
4.3.1 Absorción de agua a temperatura ambiente En los resultados de absorción de agua mostrados en la figura 9, el ladrillo con 2,5 % de Mn sin vitrificar presenta el mayor porcentaje de absorción de agua. En general, no se observa una tendencia respecto al % de Mn, pero se evidencia una disminución en el porcentaje de absorción de agua cuando el residuo se adiciona de forma vitrificada. Teniendo en cuenta la norma utilizada para la evaluación de los ladrillos [23], todos cumplen el requisito de un ladrillo no estructural.

Figura 9. Resultados del ensayo de absorción de agua a temperatura ambiente para las dos formas de adición del residuo.



4.3.2 Absorción de agua por ebullición En la figura 10 se evidencia una disminución del porcentaje de absorción de agua al adicionar el residuo de forma vitrificada. El ladrillo que presenta mayor porcentaje de absorción de agua es el de 2,5 % de Mn sin vitrificar.

Figura 10. Resultados del ensayo de absorción de agua por ebullición para las dos formas de adición del residuo.



4.4 PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LADRILLOS AL CONTACTO CON AGUA DESTILADA

En la figura 11 se presentan los resultados de la prueba de estabilidad química de los ladrillos al contacto con agua destilada, donde se evidencia que el porcentaje de manganeso y la forma de adición del residuo en los ladrillos no tienen un efecto significativo en el cambio de pH. Los resultados de la medición de conductividad se presentan en la figura 12, donde se observa un aumento de esta medida para la forma de adición de residuo sin vitrificar con 2,5% de Mn, mientras que, para las demás composiciones y formas de adición del residuo, los resultados son similares al estándar (0 % de Mn sin vitrificar).

Figura 11. Resultados de la medición de pH para las dos formas de adición del residuo.

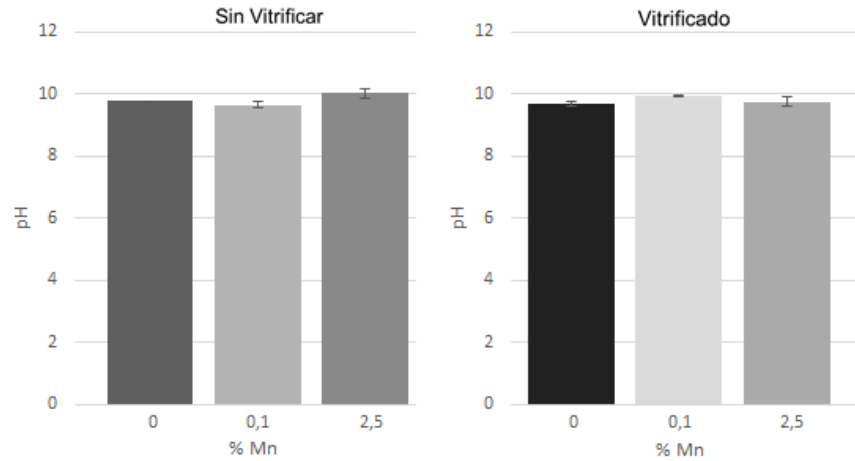
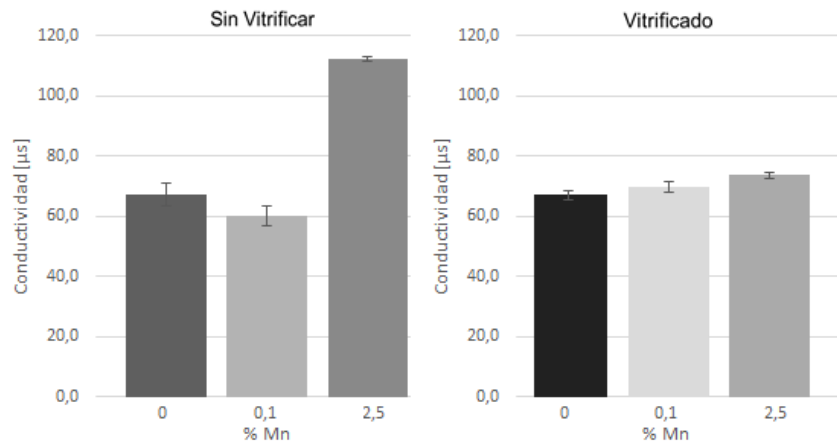


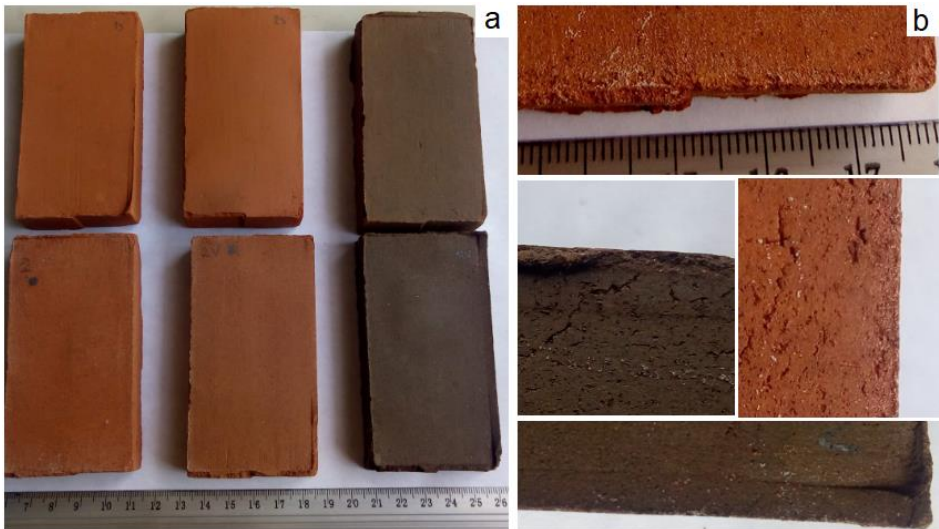
Figura 12. Resultados de la medición de conductividad para las dos formas de adición del residuo.



4.5 EFLORESCENCIA

La figura 13a muestra los ladrillos después de realizada la prueba de eflorescencia y en la figura 13b se observan a detalle algunos precipitados de sales en la superficie de estos, sin embargo, se examinaron conforme a lo indicado por la norma NTC 4017 donde se determinó que ninguno de los ladrillos es eflorescente.

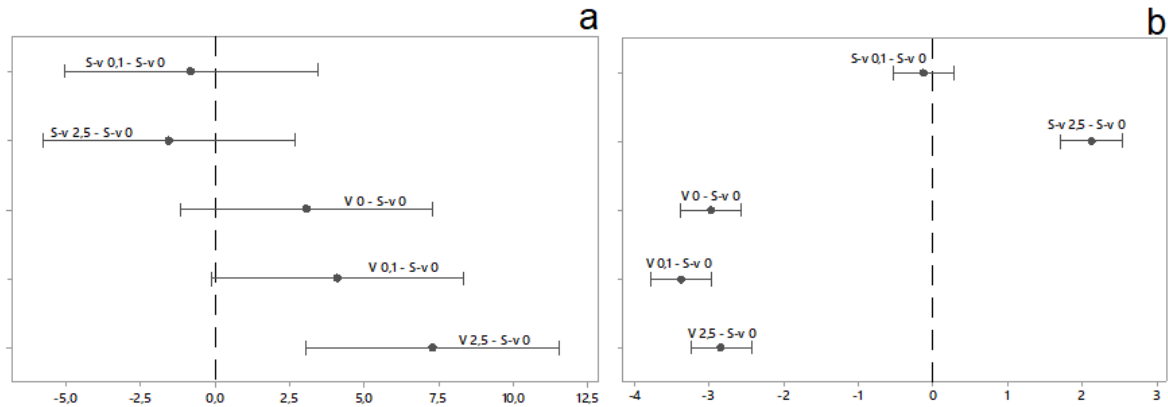
Figura 13. Ladrillos después de la prueba de eflorescencia (20 días) a) vista general b) Precipitados en detalle.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de establecer si existe influencia de las variables de control sobre la resistencia a la compresión de los ladrillos, se realizó un análisis ANOVA de los datos presentados en la figura 8. Según los resultados del análisis ANOVA de la tabla G1 (anexo G), se evidencia que la forma de adición del residuo (estado), así como la interacción de este con el % Mn, son activos (Valor-P < 0,05) en el sistema, es decir, que tienen una influencia en la resistencia a la compresión del ladrillo. A pesar de que en la figura 8 se observa un aumento en la resistencia mecánica en la forma de adición vitrificada en comparación a la adición sin vitrificar, se determinó mediante la prueba de Dunnett que todos los ladrillos tienen una resistencia estadísticamente similar al ladrillo base o tradicional a excepción del que contiene 2,5% de Mn vitrificado como se presenta en la figura 14a, sin embargo, las composiciones de 0,1 y 2,5% de Mn vitrificado cumplen los requisitos de la norma NTC 4205-2. El aumento en la resistencia se debe al alto contenido de frita ya que esta, al contener bórax (fundente), facilita la formación parcial de fase líquida, la cual ayuda a enlazar los granos, densificando así al material, promoviendo entonces la reducción de la porosidad [24], tal como se ve reflejado en la prueba de absorción de agua mostrada en la figura 8. Por otra parte, el ANOVA para el porcentaje de absorción de agua (presentado en la tabla G2 del anexo G), logró establecer que los factores: % Mn, forma de adición del residuo y la interacción de estos, son activos (Valor-P < 0,05), es decir, tienen una influencia en la cantidad de agua que absorbe el ladrillo. Todas las composiciones en las que el residuo se adicionó de forma vitrificada absorbieron menor cantidad de agua en comparación con ladrillo base y este resultado es estadísticamente significativo tal como se muestra en la prueba de Dunnett para absorción de agua (figura 14b). Para la forma de adición sin vitrificar, la composición con 0,1% de Mn presenta una absorción similar al ladrillo base y la de 2,5% Mn la supera, tal como se observa en las figuras 9 y 14b.

Figura 14. Pruebas de Dunnett a) Compresión y b) Absorción de agua.



La prueba de absorción de agua por ebullición revela la cantidad máxima de agua que puede absorber el material, esta propiedad está a su vez relacionada con la porosidad, en la figura 10 se observa que para la adición de residuo sin vitrificar la porosidad del ladrillo es mayor, lo cual está relacionado con los datos mostrados en la figura 8, pues se evidencia una caída de la resistencia a la compresión para esta forma de adición ya que la porosidad se relaciona inversamente con la resistencia máxima a la compresión.

La prueba de estabilidad química no evidencia un cambio significativo con respecto a las formas de adición ni al % de Mn para la medición de pH. Todos los ladrillos registraron un pH básico (figura 11), este se debe a la reacción de óxidos (producto de la calcinación) con el agua, formando así hidróxidos que a su vez se disocian parcialmente en el agua formando iones OH⁻.

Los resultados de conductividad de la figura 12 muestran que para la forma de adición vitrificada, la estabilización del residuo en una matriz vítrea es una alternativa para el control de este [1]. El análisis estadístico de esta prueba se realizó empleando la mediana Kruskal-Wallis, equivalente al ANOVA de un solo factor; en la tabla G3 e G4 del anexo G se muestran los resultados para la comparación de los factores %Mn y forma de adición respectivamente, donde se evidencia que existen diferencias significativas entre los valores de la mediana del factor %Mn y el factor forma de adición ($p < 0,05$), es decir, que son activos en el

sistema. Sin embargo, no es posible descartar que la combinación de los dos factores tenga alguna influencia en la conductividad ya que mediante la prueba Kruskal-Wallis, no es posible estudiar las interacciones entre los factores.

Otros autores [11,25] han evaluado el efecto de la incorporación de diferentes residuos a los ladrillos, obteniendo los resultados de la tabla 3, algunos de estos con presencia de fundentes y otros tipos de residuos provenientes de diferentes industrias.

Tabla 3. Propiedades obtenidas de ladrillos con diferentes tipos de residuos.

Autor/es	Tipo de residuo	Adición [%]	Resistencia a la compresión[MPa]	% Abs. Agua
El presente trabajo	Residuo de batería (sin vitrificar)	5	9,14	15,88
	Residuo de batería (vitrificado)	15	17,96	10,91
Shih y compañía	Escoria de acería	5	6,37	28,36
		10	5,36	29,39
		15	2,39	37,34
Raut y compañía	Cenizas	20	8,00	11,00
	Colillas de cigarrillo	10	2,50	19,50
	Pulpa de papel	35	36,50	105,00
	Lodos secos	10	21,00	8,00

6. CONCLUSIONES

Es posible fabricar ladrillos incorporando el residuo obtenido del cátodo de baterías alcalinas variando la cantidad de este y su forma de adición en la mezcla manteniendo las propiedades estadísticamente iguales a las de los ladrillos tradicionales.

La vitrificación del residuo antes de ser añadido al ladrillo, no solo lo hace estable químicamente, también mejora las propiedades que requiere un ladrillo en comparación a la adición sin vitrificar, siendo así una alternativa eficiente para la disposición de este residuo.

Los ladrillos con las composiciones de 0,1 y 2,5% de Mn vitrificado obtuvieron la mayor resistencia a la compresión y cumplen con las especificaciones establecidas por la norma NTC 4205-2 para un ladrillo no estructural.

El aspecto visual de los ladrillos terminados ofrece una variedad de colores y acabados dependiendo de la cantidad y forma de adición del residuo, ofreciendo un valor agregado a este y, posiblemente cierta ventaja comercial frente al ladrillo tradicional.

A pesar de la incorporación de residuo en los ladrillos, estos presentan poca eflorescencia y la absorción de agua no supera los valores establecidos por la norma NTC 4205-2.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] SOLANO, María y VERA, Jhonatan. Vitrificación del polvo catódico recuperado a partir de pilas desechadas, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [2] COLOMBO, Paolo, *et al.* Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2003. 7(3), p.225- 239.
- [3] BINHUSSAIN, Mohammed, *et al.* Sintered and glazed glass-ceramics from natural and waste raw materials. *Ceramics International*, 2014, 40(2), p.3543-3551.
- [4] Instituto Internacional de Tecnología Industrial. El Valor de los Residuos, Buenos Aires, Argentina, Dirección de Comunicación del INTI. 2016, p. 71-72. (Recuperado en 16 Octubre 2018.) Disponible en https://www.inti.gob.ar/ambientesg/pdf/El_valor_de_los_residuos.pdf
- [5] SHAKIR, Alaa ; MOHAMMED, Alí . Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review, *IJAAS*, 2013 .
- [6] AESLINA, Abdul, *et al.* Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light weight fired clay bricks incorporating cigarette butts, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 2. p 179-184, 2010.
- [7] ESPINOSA, Caroline, *et al.* The use of submerged-arc welding flux slag as raw material for the fabrication of multiple-use mortars and bricks, *Soldagem Insp. Sao Palo*, Vol.14. p. 257–262, 2009.
- [8] SANTURDE, Alonso, *et al.* Recycling of foundry byproducts in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks, *Construction and Building Material*, Vol. 7. p. 96-106, 2012.
- [9] FARIA, K, *et al.* Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks, *Environmental Management*, Vol. 101. p. 7-12, 2012.
- [10] RAUT, Sanjay; RALEGAONKAR, Raul y MANDAVGANE, Sachin. Development of sustainable construction material using industrial and

agricultural solid waste: A review of waste-create bricks, *Construction and Building Material*, Vol. 25. p. 4037-4043, 2011.

- [11] VORRADA, Loryuenyong, *et al.* Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks, *Waste Management*, Vol. 29. p. 2717– 2721, 2009.
- [12] GARCÍA, Martínez, *et al.* Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 95. p. 5343-5348, 2012.
- [13] SUTCU, Mucahit y AKKURT Sedat. The use of recycled paper processing residue in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramic International*, Vol. 35. p. 2625–263, 2009.
- [14] DUGGAL S.K, *Building Materials*, Nueva Delhi, India, New Age Publishers, 2009. Capítulo 2: Structural Clay Products, p. 8-52.
- [15] BERGE, Bjørn. *The Ecology of Building Materials*, Londres, UK, Routledge, 2009. Capítulo 13: Structural Materials, p. 189-238.
- [16] Memorias del VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES (CIM 2015) ISSN: 2500-6452.
- [17] VARGAS, Claudia. FORMULACIÓN DE ESMALTES CERÁMICOS A PARTIR DE FRITAS DE VIDRIO PROVENIENTES DE MATERIAS PRIMAS RECICLADAS, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [18] PABON, Franklin y CALA, Nain. Producción de cerámicas tradicionales basadas en arcillas, que incorporan sustancias vítreas recuperadas de la basura electrónica, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [19] ASTM International, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM D4318-17e1, 2017.
- [20] ASTM International. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. ASTM C20-00, 2015.
- [21] ASTM International. Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials. ASTM C674-13, 2018.

- [22] Norma Técnica Colombiana, MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA, NTC 4017, 2018.
- [23] Norma Técnica Colombiana, UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS. PARTE 2: MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL, NTC 4205-2, 2009.
- [24] CULTRONE, Giuseppe, et al. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society* 24, 2004, p.547–564.
- [25] SHIH, Pai-Haung; WU, Zong-Zheng y CHIANG, Hung-Lung. Characteristics of bricks made from waste steel slag, *Waste Management*, Vol. 24. p. 1043–1047, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM International. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. ASTM C20-00, 2015.

ASTM International. Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials. ASTM C674-13, 2018.

ASTM International, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM D4318-17e1, 2017.

AESLINA, Abdul, et al. Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light weight fired clay bricks incorporating cigarette butts, International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 2. p 179-184, 2010.

BERGE, Bjørn. The Ecology of Building Materials, Londres, UK, Routledge, 2009. Capítulo 13: Structural Materials, p. 189-238.

BINHUSSAIN, Mohammed, et al. Sintered and glazed glass-ceramics from natural and waste raw materials. Ceramics International, 2014, 40(2), p.3543-3551.

COLOMBO, Paolo, et al. Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2003. 7(3), p.225- 239.

CULTRONE, Giuseppe, et al. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society 24, 2004, p.547–564.

DUGGAL S.K, Building Materials, Nueva Delhi, India, New Age Publishers, 2009.
Capítulo 2: Structural Clay Products, p. 8-52.

ESPINOSA, Caroline, et al. The use of submerged-arc welding flux slag as raw material for the fabrication of multiple-use mortars and bricks, Soldagem Insp. Sao Palo, Vol.14. p. 257–262, 2009.

FARIA,K, et al. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks, Environmental Management, Vol. 101. p. 7-12, 2012.

GARCÍA, Martínez, et al. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. Journal of Environmental Engineering, Vol. 95. p. 5343-5348, 2012.

Instituto Internacional de Tecnología Industrial. El Valor de los Residuos, Buenos Aires, Argentina, Dirección de Comunicación del INTI. 2016, p. 71-72. (Recuperado en 16 Octubre 2018.) Disponible en https://www.inti.gob.ar/ambientesg/pdf/El_valor_de_los_residuos.pdf

Memorias del VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES (CIM 2015)
ISSN: 2500-6452.

Norma Técnica Colombiana, MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA, NTC 4017, 2018.

Norma Técnica Colombiana, UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS. PARTE 2: MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL, NTC 4205-2, 2009.

PABON, Franklin y CALA, Nain. Producción de cerámicas tradicionales basadas en arcillas, que incorporan sustancias vítreas recuperadas de la basura electrónica, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2018.

SANTURDE, Alonso, et al. Recycling of foundry byproducts in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks, *Construction and Building Material*, Vol. 7. p. 96-106, 2012.

SHAKIR, Alaa ; MOHAMMED, Alí . Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review, *IJAAS*, 2013 .

SHIH, Pai-Haung; WU, Zong-Zheng y CHIANG, Hung-Lung. Characteristics of bricks made from waste steel slag, *Waste Management*, Vol. 24. p. 1043–1047, 2004.

SOLANO, María y VERA, Jhonatan. Vitrificación del polvo catódico recuperado a partir de pilas desechadas, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.

SUTCU, Mucahit y AKKURT Sedat. The use of recycled paper processing residue in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramic International*, Vol. 35. p. 2625–263, 2009.

RAUT, Sanjay; RALEGAONKAR, Raul y MANDAVGANE, Sachin. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks, *Construction and Building Material*, Vol. 25. p. 4037-4043, 2011.

VARGAS, Claudia. FORMULACIÓN DE ESMALTES CERÁMICOS A PARTIR DE FRITAS DE VIDRIO PROVENIENTES DE MATERIAS PRIMAS RECICLADAS, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.

VORRADA, Loryuenyong, et al. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks, Waste Management, Vol. 29. p. 2717– 2721, 2009.

ANEXOS

ANEXO A. FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS

Figura A1. Conformado de los ladrillos. a) Apisonado manual, b) Lubricación del molde y c) Probetas en verde.

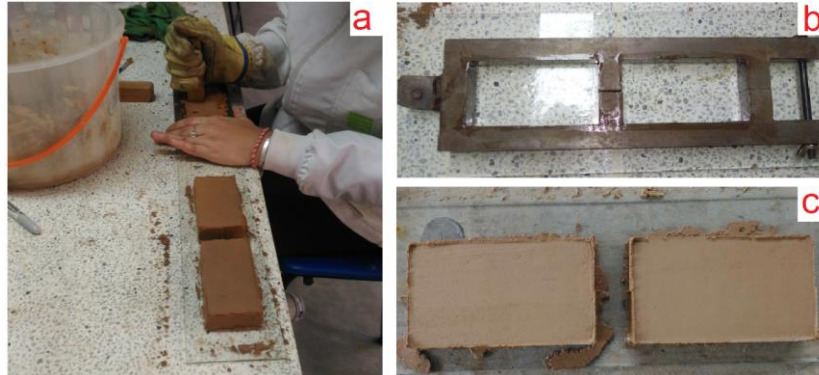


Figura A2. Resultados de la prueba de la temperatura adecuada de sinterización.



Se seleccionó la de 950°C por prueba sonora como lo indica la norma NTC 4017 y por la apariencia que estos presentaban, en el ladrillo sinterizado a 1050 °C se observa un redondeado de los bordes producto de la deformación

Figura A3. Sinterizado de ladrillos. a) Horno de sinterización con probetas secas y b) Probetas de diferentes composiciones sinterizadas.



ANEXO B. PRUEBA DE COMPRESIÓN

Figura B1. Ensayo de compresión. a) Posición del ladrillo para la prueba de compresión, b) Fractura característica del ensayo.

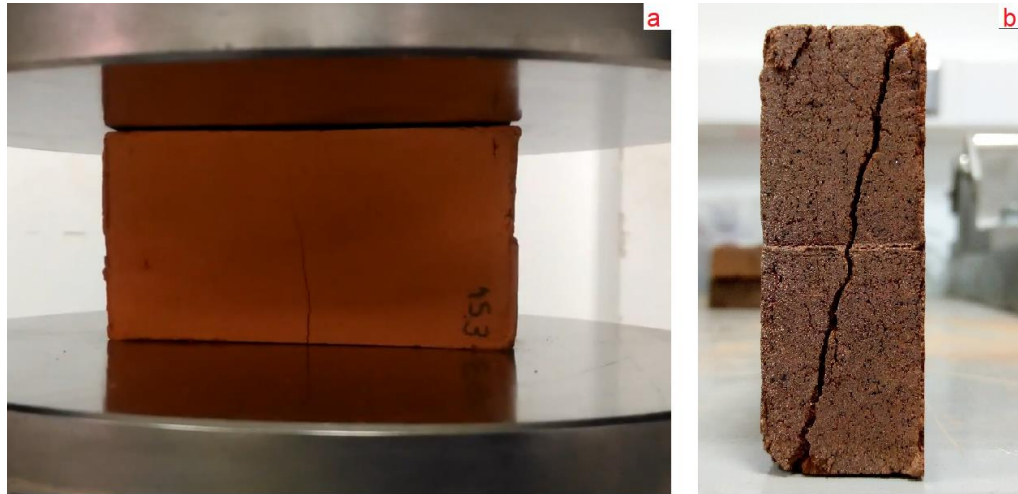


Tabla B1. Resultados prueba de compresión.

Ensayo de Compresión									
	% Mn	Resistencia [MPa]							
Sin vitrificar	0	11,1	8,8	8,4	11,1	11,5	15,0	12,3	7,3
	0,1	6,3	9,7	11,9	8,4	10,3	9,8	9,1	13,4
	2,5	5,8	4,7	11,1	7,2	12,9	13,1	10,0	8,3
Vitrificado	0	11,4	13,6	20,3	12,6	7,7	15,6	14,5	14,3
	0,1	21,2	13,8	11,5	13,3	14,0	16,9	12,5	14,9
	2,5	15,0	21,2	24,5	20,7	14,8	13,0	13,0	21,4

ANEXO C. PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA

Figura C1. Montaje experimental a) absorción de agua y b) absorción de agua por ebullición.

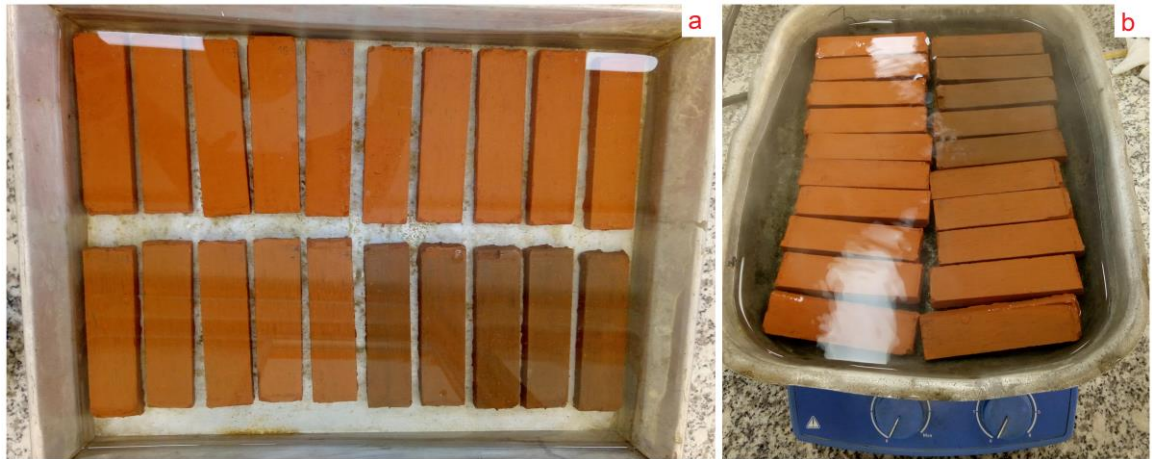


Tabla C1. Resultados pruebas de absorción de agua para ladrillos con adición de residuo sin vitrificar.

Adición	% Mn	% Absorción					% abs. Ebull				
Sin Vitrificar	0	13,78	13,94	13,95	13,72	13,41	16,11	16,82	16,94	16,22	15,75
	0,1	13,54	13,45	13,7	13,9	13,56	16,31	16,07	16,48	16,31	16,06
	2,5	16,32	15,9	15,77	15,92	15,5	18,74	18,13	18,35	18,27	17,82
Vitrificar	0	10,85	10,55	10,66	11,1	10,75	14,84	14,5	14,53	15,06	14,56
	0,1	10,48	10,03	10,37	10,68	10,4	14,37	13,9	14,2	14,61	14,21
	2,5	10,8	10,92	11,35	10,92	10,58	15,09	15,09	15,64	14,83	14,6

ANEXO D. PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LADRILLOS AL CONTACTO CON AGUA DESTILADA

Los valores registrados de pH y conductividad para el agua destilada utilizada son 6,09 y 1,46 respectivamente.

Tabla D1. Resultados de la medición de pH.

Sin Vitrificar						Vitrificado					
% Mn	t [min]	pH				% Mn	t [min]	pH			
0	60	9,74	9,77	9,75	9,78	0	60	9,62	9,64	9,72	9,76
0,1	60	9,52	9,58	9,72	9,74	0,1	60	9,94	9,91	9,95	9,98
2,5	60	9,91	9,95	10,2	9,98	2,5	60	9,91	9,88	9,58	9,65

Tabla D2. Resultados de la medición de conductividad.

Sin Vitrificar						Vitrificado					
% Mn	t [min]	Conductividad [$\mu\text{s}/\text{cm}$]				% Mn	t [min]	Conductividad [$\mu\text{s}/\text{cm}$]			
0	60	70,5	70,7	63,9	64,3	0	60	68,3	68,8	65,7	65,4
0,1	60	63,1	63,4	57,4	57,5	0,1	60	70,8	71,7	67,9	68,3
2,5	60	112,3	113,3	112,1	111,5	2,5	60	72,8	73,4	73,9	75,1

ANEXO E. PRUEBA DE PLASTICIDAD

Esta prueba se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D4318-17, se moldeó la arcilla con adiciones de agua hasta obtener especímenes de 3 mm.

Figura E1. a) Muestra de 50 g para la prueba de plasticidad y b) espécimen moldeado.



Tabla E1. Resultados prueba de plasticidad

% Mn	Sin Vitricar				Vitrificado			
	Límite Plástico [mL]			Promedio	Límite Plástico [mL]			Promedio
0	11	11,4	11	11,1	12	11,8	12,2	12,0
0,1	10,8	10,8	11	10,9	12,2	12	12	12,1
2,5	9,4	9,4	9,8	9,5	12,4	12	12,4	12,3

ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Figura F1. Análisis de partícula de las materias primas utilizadas.

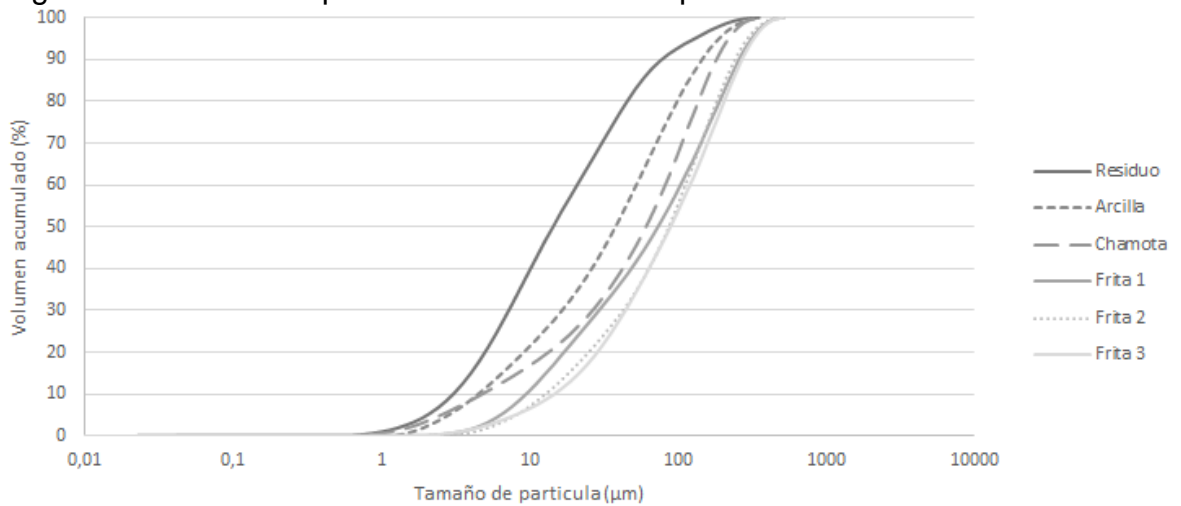


Figura F2. FTIR arcilla.

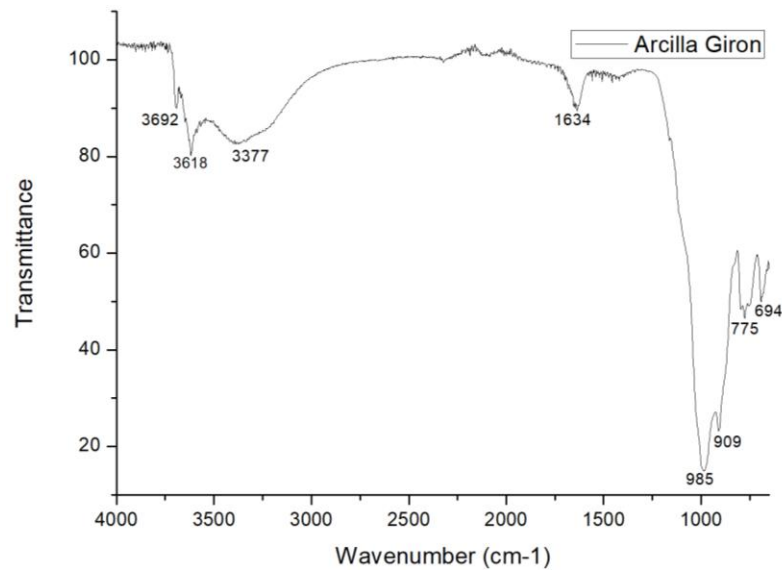


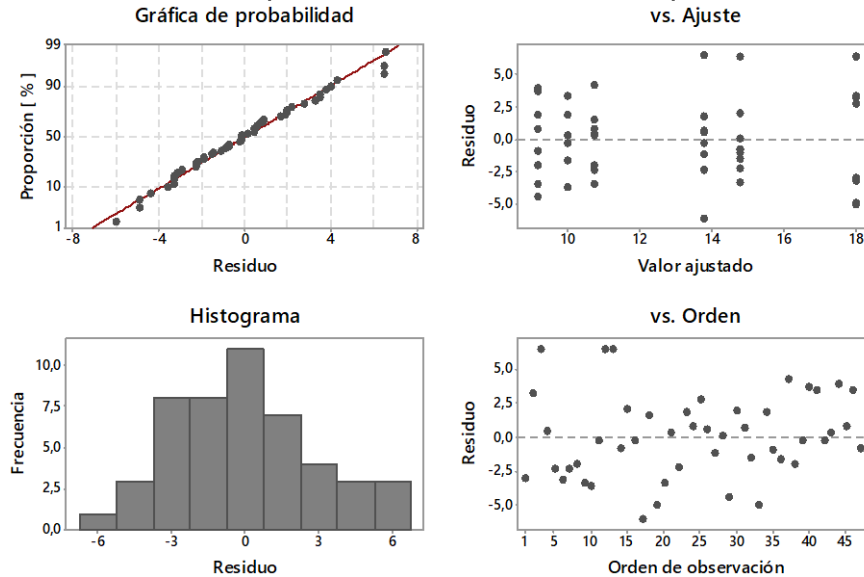
Tabla F1. Puntos analizados del FTIR.

N° de onda [cm-1]	Grupo	N° de onda [cm-1]	Grupo
3692		985	
3618	O-H	909	Silicatos
3377		775	
1634	Carboxilatos	694	

Conforme a la literatura utilizada se describieron los grupos o tipos de enlace a los que pertenece comúnmente cada uno de los valores del número de onda mostrados en la figura F2.

ANEXO G. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Figura G1. Verificación de supuestos resistencia a la compresión.



En la figura G1 se presenta la verificación de supuestos que indica que para estos datos se puede realizar un análisis ANOVA, ya que la gráfica de probabilidad tiene una tendencia lineal, el valor ajustado se mantiene dentro de un rango, el histograma se asemeja a una campana de distribución y el orden de los datos es aleatorio o disperso.

Tabla G1. ANOVA Resistencia a la compresión.

Fuente	Grados de libertad	Adj SS	Adj MS	Razón F	Valor-P
% Mn	2	17,06	8,532	0,81	0,45
Forma de adición del residuo	1	371,8	371,82	35,5	0
Interacción %Mn - Estado	2	69,68	34,839	3,33	0,046
Error	42	439,9	10,473		

La figura G2 evidencia el aumento de la resistencia a la compresión al adicionar el residuo de forma vitrificada en comparación con el residuo sin vitrificar y que la cantidad de residuo en los ladrillos tiene una relación directa. En cuanto a la interacción de la forma de adición con el % de Mn, en la figura G3 se observan cambios de pendiente de las rectas para cada una de las composiciones.

Figura G2. Grafica efectos principales resistencia a la compresión.

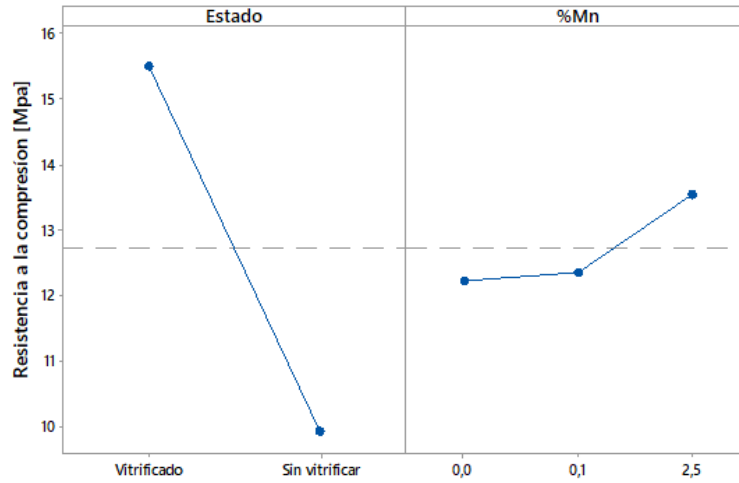


Figura G3. Grafica de interacciones de factores resistencia a la compresión.

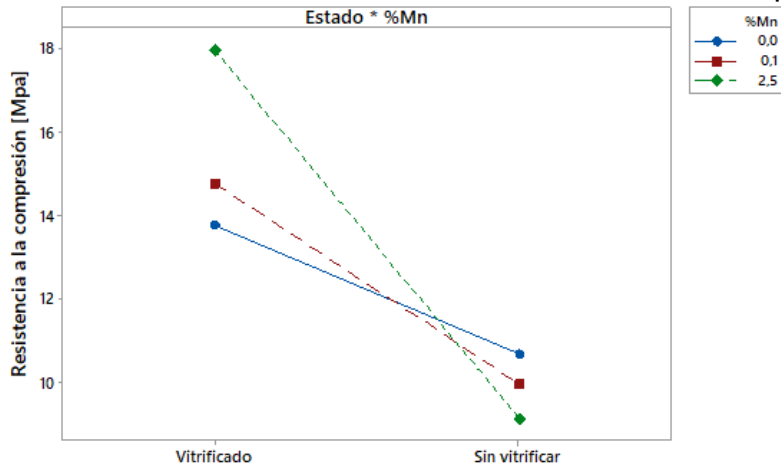
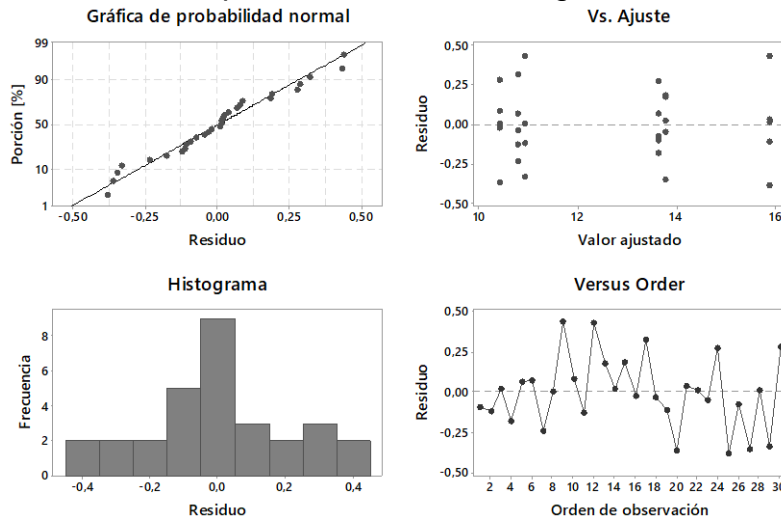


Figura G4. Verificación de supuestos absorción de agua.



En la figura G5 se presenta la gráfica de efectos principales de los factores, donde se observa una disminución considerable del % de absorción de agua de la forma de adición vitrificada respecto a la de sin vitrificar. Por otra parte, la gráfica muestra una curvatura en la curva que representa el comportamiento de % de absorción de agua respecto %Mn, lo que muestra que la relación % de absorción de agua - %Mn no corresponde a un comportamiento lineal. En cuanto a la interacción de los factores, en la figura G6 se muestra cambios de pendientes abruptos, lo que concuerda con los resultados de la ANOVA para la interacción.

Figura G5. Grafica efectos principales absorción de agua.

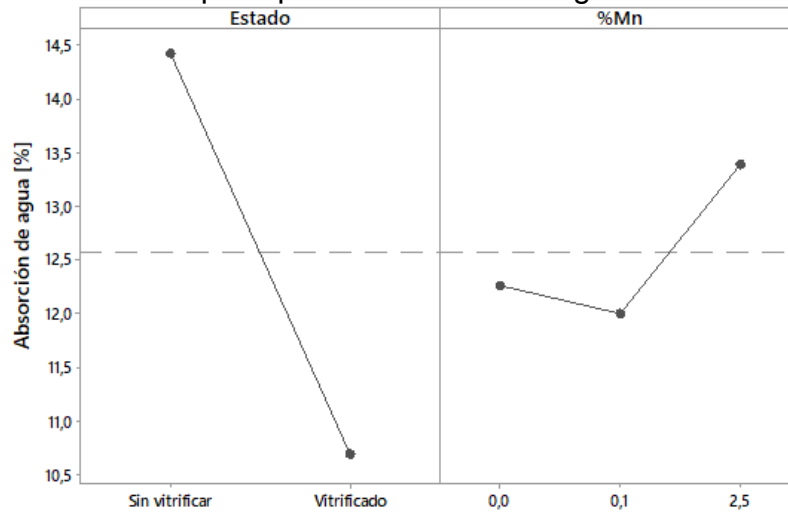


Figura G6. Grafica de interacciones de factores absorción de agua.

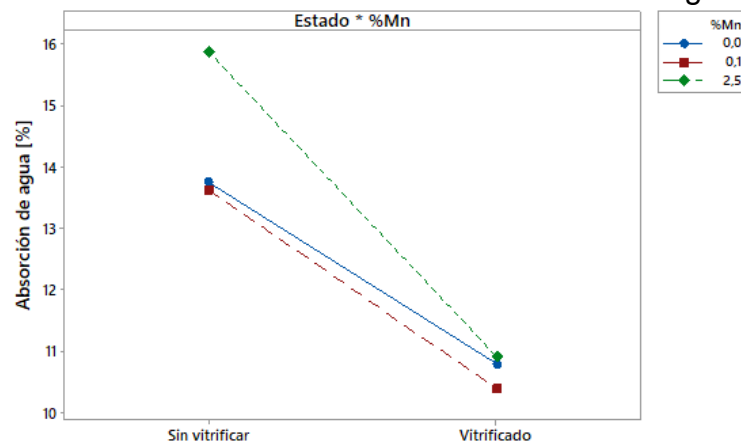


Tabla G2. ANOVA absorción de agua.

Fuente	Grados de libertad	Adj SS	Adj MS	Razón F	Valor-P
% Mn	3	20,095	6,6983	80,09	0,000
Forma de adición del residuo	1	80,97	80,97	968,09	0,000
Interacción %Mn - Estado	3	29,463	9,8211	117,42	0,000
Error	32	2,676	0,0836		

Debido a que los datos no cumplen el supuesto de normalidad y de varianza constante, sumado a que estos son resistentes a las transformaciones, no fue posible realizar un ANOVA. Por tanto, se utilizaron herramientas estadísticas alternativas.

Tabla G3. Kruskal-Wallis para % Mn

% Mn	N	Mediana	Ave Rank	Z
0	8	67	9,4	-1,5
0,1	8	65,65	7,6	-2,4
2,5	8	93,3	20,5	3,92
Overall	24		12,5	
H= 15,64		DF= 2	P= 0,000	

Tabla G4. Kruskal-Wallis para estado

Adición	N	Median	Ave Rank	Z
Sin Vitricificar	12	67,4	11,5	-0,7
Vitricificado	12	69,8	13,5	0,69
Overall	24		12,5	
H= 0,48		DF= 1	P= 0,488	