

**PRODUCCIÓN DE CERÁMICAS TRADICIONALES BASADAS EN ARCILLAS,
QUE INCORPORAN SUSTANCIAS VÍTREAS RECUPERADAS DE LA BASURA
ELECTRÓNICA**

**FRANKLIN JAVIER PABON VILLAMIZAR
YASET NAIN CALA RODRIGUEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2018**

**PRODUCCIÓN DE CERÁMICAS TRADICIONALES BASADAS EN ARCILLAS,
QUE INCORPORAN SUSTANCIAS VÍTREAS RECUPERADAS DE LA BASURA
ELECTRÓNICA**

**FRANKLIN JAVIER PABON VILLAMIZAR
YASET NAIN CALA RODRIGUEZ**

**Trabajo de grado, modalidad: proyecto de investigación para optar al título
de Ingeniero Metalúrgico**

Director:

**PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA
Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIA

A mi madre marta, por su dedicación, paciencia y amor en todo el trayecto de mi vida hasta llegar a este gran logro.

A mi padre Robinson, mi hermana Pamela y mi abuela Bernarda por brindarme toda su sabiduría y apoyo incondicional.

A Dios por permitirme culminar mi carrera profesional.

Yaset Nain Cala Rodriguez

DEDICATORIA

Agradezco este logro a mi abuela Carmen Rosa la cual me apoyo y crio desde pequeño.

A mi hermano Jhon por su apoyo y paciencia a todos mis errores, a mi tío Humberto el cual me apoyo en toda la carrera en cada semestre.

A mis tías Socorro y Esperanza las cuales siempre me animaban y colaboraban cuando más lo necesitaba.

A mi primo Carlos por ayudarme en toda la papelería de la carrera.

Mis papás los cuales a pesar de sus dificultades siempre me animaban para que estudiara y así poder obtener este título profesional.

A Dios y la virgen por darme la sabiduría y alegría de ser un profesional.

Franklin Javier Pabon Villamizar

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por ser nuestro segundo hogar y formarnos con valores y alta calidad académica

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

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

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	20
2.1. FORMULACIÓN DE MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS	21
2.1.1. Obtención y preparación de las materias primas.	21
2.1.2. Granulometría de las materias primas	22
2.1.3. Diseño de las mezclas	22
2.1.4. Fabricación de los moldes	23
2.2. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS.....	24
2.2.1. Mezcla y homogeneización.....	24
2.2.2. Proceso de secado y cocción.	25
2.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA	25
2.3.1. Ensayo de compresión.....	26
2.3.2. Ensayo de flexión.....	26
2.3.3. Ensayo de absorción de agua.....	27
2.3.4. Ensayo de succión de agua o tasa inicial de absorción (T.I.A).	27
2.4. DENSIDAD DEL PRODUCTO	28
2.5. CONTRACCIÓN LINEAL DE LAS PROBETAS DURANTE LA COCCIÓN	28
2.6. CÁLCULO TEÓRICO DEL CONTENIDO DE MERCURIO EN LAS	29
PROBETAS.....	29
2.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS EXUDADOS GENERADOS DURANTE LA	29
COCCIÓN DE LAS PROBETAS.....	29
3. RESULTADOS	31

3.1.	GRANULOMETRÍA DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	31
3.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	32
3.2.1.	Ensayo de compresión.....	32
3.2.2.	Ensayo de flexión.....	33
3.3.	PROPIEDADES DE ABSORCIÓN DE AGUA	33
3.3.1.	Ensayo de absorción de agua.....	33
3.3.2.	Ensayo de tasa inicial de absorción (succión) T.I.A.	34
3.4.	DENSIDAD DEL PRODUCTO DESPUÉS DE LA COCCIÓN.....	35
3.5.	CONTRACCIÓN LINEAL DEL PRODUCTO DURANTE LA COCCIÓN ...	35
3.6.	ASPECTO VISUAL DEL PRODUCTO	36
3.7.	CÁLCULO TEÓRICO DEL CONTENIDO DE MERCURIO.....	37
3.8.	DEFECTOS DE EXUDACIÓN Y SU CARACTERIZACIÓN	38
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
5.	CONCLUSIONES.....	44
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	BIBLIOGRAFÍA	48
	ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Formulación de mezclas de las probetas cerámicas.	23
Tabla 2. Cantidad teórica de mercurio presente en las probetas fabricadas antes de la cocción.	37
Tabla 3. Presencia o no de defectos de exudación en las probetas cerámicas producidas.	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema general del procedimiento experimental.	20
Figura 2. Curva de cocción de las probetas cerámicas.	25
Figura 3. Gráfica de granulometría por Rosin-Rammler de las diferentes materias primas empleadas en este trabajo. El tamaño de partícula “x” viene dado en micrómetros.	31
Figura 4. Gráfica del comportamiento de las probetas cerámicas al ensayo de compresión. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.	32
Figura 5. Grafica del comportamiento de las probetas al ensayo de flexión. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos. ...	33
Figura 6. Ensayo de absorción de agua. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.	34
Figura 7. Ensayo de tasa inicial de absorción (succión) T.I.A. de las probetas cerámicas producidas. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.	34
Figura 8. Valores de densidad promedio de las probetas cerámicas producidas. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos. ...	35
Figura 9. Porcentaje de contracción lineal del producto luego de la cocción. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos. ...	36
Figura 10, aspecto visual probetas tipo B con material vítreo de lámparas luminarias (V1, V5, V10, V15).	36
Figura 11. Aspecto visual de la probeta cerámica V5 tipo A.	37
Figura 12. a) Superficie de la probeta cerámica V5, en la que se aprecia la presencia de exudados blancos de material vítreo. b) Interior probeta cerámica V5 (superficie de fractura), en la que se aprecian halos vítreos alrededor de los poros.	39
Figura 13. Posible mecanismo para la formación de poros con halos vítreos y defectos de exudación superficial en las probetas que incorporaron vidrio de	

luminarias fluorescentes. (a) Partícula de vidrio en la mezcla, la cual al fundir y generar gas produce burbujas como en (b), que, a su vez, al producir sobrepresión, hacen que el vidrio líquido migre por grietas llegando a la superficie, generando así exudaciones vítreas en la superficie del producto.41

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Composición química del polvo fosforado y el vidrio.	52
Anexo B. Granulometría se las materias primas.	53
Anexo C. Moldes de las probetas cerámicas.	55
Anexo D. Preparación de las mezclas.	56
Anexo E. Ensayo de compresión.	57
Anexo F. Tabla de compresión y absorción de agua (norma NTC 4205-1).	59
Anexo G. Ensayo de flexión.	60
Anexo H. Ensayo de absorción de agua.	62
Anexo I. Ensayo de tasa de absorción inicial (succión).	64
Anexo J. Cálculo de la densidad de las probetas cerámicas.	66
Anexo K. Cálculo del porcentaje de contracción lineal de las probetas cerámicas.	67
Anexo L. Análisis químico de los exudados.	68
Anexo M. Calculo patrón del cálculo teórico del contenido de mercurio en las probetas.	69

RESUMEN

TÍTULO: PRODUCCIÓN DE CERÁMICAS TRADICIONALES BASADAS EN ARCILLAS, QUE INCORPORAN SUSTANCIAS VÍTREAS RECUPERADAS DE LA BASURA ELECTRÓNICA.

AUTORES: Pabón Villamizar, Franklin Javier** Cala Rodriguez, Yaset Nain**

PALABRAS CLAVES: Probetas cerámicas, Vidrio de luminaria, Polvo fosforado, Vidrio reciclado, Arcilla.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo de grado se realizaron las formulaciones de probetas cerámicas, aplicables en la industria de la construcción. A partir de la sustitución de las materias primas de las cerámicas tradicionales con productos reciclables, para efectos de este proyecto de investigación elementos de lámparas de luminarias, específicamente el material vítreo y el polvo fosforado. Se fabricaron ocho mezclas, en donde, el material sustituido en todas las mezclas fue la arcilla, en donde se fabricó una mezcla denominada patrón para efectos de comparación con los cerámicos tradicionales, cuatro formulaciones más que constaron con la variación de material vítreo de las lámparas luminarias, otra con sustitución de vidrio de botellas transparentes del tipo *soda-lime* y una última composición con la presencia de polvo fosforado. Se realizaron ensayos de compresión, absorción de agua, tasa inicial de absorción apoyados en la norma técnica colombiana NTC 4205, además de estas pruebas, se realizó el estudio del módulo de rotura, densidad, contracción lineal, cálculo teórico del contenido de mercurio y un estudio adicional de la composición química de los exudados que se presentaron en algunas de las probetas terminadas. A partir de los resultados obtenidos se observó una mejora de las propiedades físicas, mecánicas y de absorción de agua, lo cual permite contemplar la posibilidad de aprovechar este tipo de sustituciones con basura electrónica para la fabricación de estos productos de forma industrial.

*Proyecto de grado, modalidad investigación

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

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita.

ABSTRACT

TITLE: PRODUCTION OF TRADITIONAL CERAMICS BASED ON CLAYS, THAT INCORPORATE VITREOUS SUBSTANCES RECOVERED FROM ELECTRONIC WASTE.

AUTHORS: Pabón Villamizar, Franklin Javier** Cala Rodriguez, Yaset Nain**

KEYWORDS: Ceramic test tubes, luminaire glass, phosphor powder, recycled glass, clay.

DESCRIPTION: In this degree thesis work were made the formulations of ceramic test tubes, applicable in the construction industry, through substitution of the raw materials of traditional ceramic based on clays with recycled products, for the purposes of this research project, lamp elements were used, specifically the vitreous material and the phosphorus powder. Eight mixtures were manufactured, where the material substituted in all the mixtures was clay, which a mixture called pattern was made for comparison with traditional ceramics, four more formulations that included the variation of vitreous material of the lamp luminaires, another with glass replacement of transparent bottles of the soda-lime type and a last one with the presence of phosphorous powder. In this project were carried out: compression tests, water absorption, initial absorption rate supported by the Colombian technical standard NTC 4205, In addition to these tests, the study of the modulus of rupture, density, linear shrinkage, theoretical calculation of the mercury content and an additional study of the chemical composition of the exudates that were presented in some of the finished specimens was carried out. Based on the results, an improvement of the physical, mechanical and water absorption properties was observed, which allows contemplating the possibility of taking advantage of this type of substitutions with electronic waste for the manufacture of these products in an industrial way.

*Degree project, research mode

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la contaminación por residuos electrónicos afecta particularmente a Colombia, debido a que en este país no se practica el reciclaje de estos desechos a gran escala. La basura electrónica puede servir como materia prima en diversos procesos industriales. Este es el caso de las lámparas fluorescentes, las cuales son desechadas diariamente y cuentan con la particularidad que pueden ser reutilizadas en la producción de cerámicas tradicionales. Según datos suministrados por el programa LUMINA, en Colombia se estima que desde el año 2012 se ha logrado recolectar aproximadamente 2.400 Ton de residuos de bombillas equivalentes a un poco más de trece millones de unidades, de esta manera se ha logrado recuperar 112 [kg] de Mercurio [1].

Entre las cerámicas tradicionales, el ladrillo es uno de los productos de mayor demanda, por su uso significativo en la industria de la construcción. Los ladrillos de base arcilla están constituidos principalmente por: arcilla (caolín, silicatos hidratados de alúmina, montmorillonita e illita), feldespato, chamota y entre otros compuestos. El feldespato cumple la función de disminuir la temperatura de sinterización y el coeficiente de dilatación del ladrillo, la chamota se utiliza como desengrasante, además de mejorar la textura, reduce la contracción y evita la formación de grietas durante la cocción [2].

Investigadores brasileños incorporaron vidrio de residuos de lámparas fluorescentes en cerámica base arcilla, incorporando 30% en peso en los cerámicos. Esto logró la disminución de la absorción de agua y una mejora significativa de la resistencia a la flexión [3] y compresión [4]. Por otro lado, investigadores italianos [5] fabricaron ladrillos usando entre un 30% y 40% en peso de material vítreo de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE) reciclados como fundente, argumentando en sus resultados un mejor comportamiento del producto al llevarlo a elevadas temperaturas.

En 2015 se realizaron estudios [6, 7] que involucraban análisis microestructural y de humectabilidad de la cerámica arcillosa incorporada con la lámpara fluorescente, con el fin de evaluar la interacción entre la superficie de la cerámica arcillosa y los residuos de vidrio en función de la temperatura de cocción. En este caso, el fundente contribuyó a los mecanismos cerámicos de sinterización, reduciendo la porosidad. Se encontró además que el ángulo de contacto disminuyó con el aumento de la temperatura, alcanzando un valor de 79 °, a una temperatura de 1100 ° C, pero no suficiente para mojar completamente la cerámica, pero, la composición química compatible y la reducción de la porosidad por el flujo de residuos de vidrio blando entre las partículas de arcilla favorecen la consolidación de la estructura cerámica por encima de 900°C [7]. Otros estudios que incorporaron sustancias vítreas obtenidas de las lámparas fluorescentes en arcillas establecieron los puntos de sinterización y de reblandecimiento alrededor de 650 ° C y 800 °C, mostrando la presencia de impurezas en la composición del residuo de vidrio [8].

Con base en la revisión bibliográfica realizada, el presente trabajo tendrá como propósito evaluar la incorporación de residuos de luminarias fluorescentes desechadas en formulaciones de base arcilla para la confección de probetas de un producto de alfarería modificado, utilizable como ladrillo para construcción. De igual manera, se pretenden determinar los cambios en las propiedades mecánicas y físicas que se producen como consecuencia de esta modificación. De esta forma, se pretende generar conocimiento que persiga un uso adecuado de este tipo de residuos especiales, el cual promueva su aprovechamiento contribuir así al desarrollo sostenible, al disminuir el uso de materias primas vírgenes y prevenir la contaminación ambiental que genera el vertimiento de residuos electrónicos a la naturaleza.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Producir cerámicas tradicionales basadas en arcillas de Girón, Santander; que incorporen sustancias vítreas recuperadas de la basura electrónica.

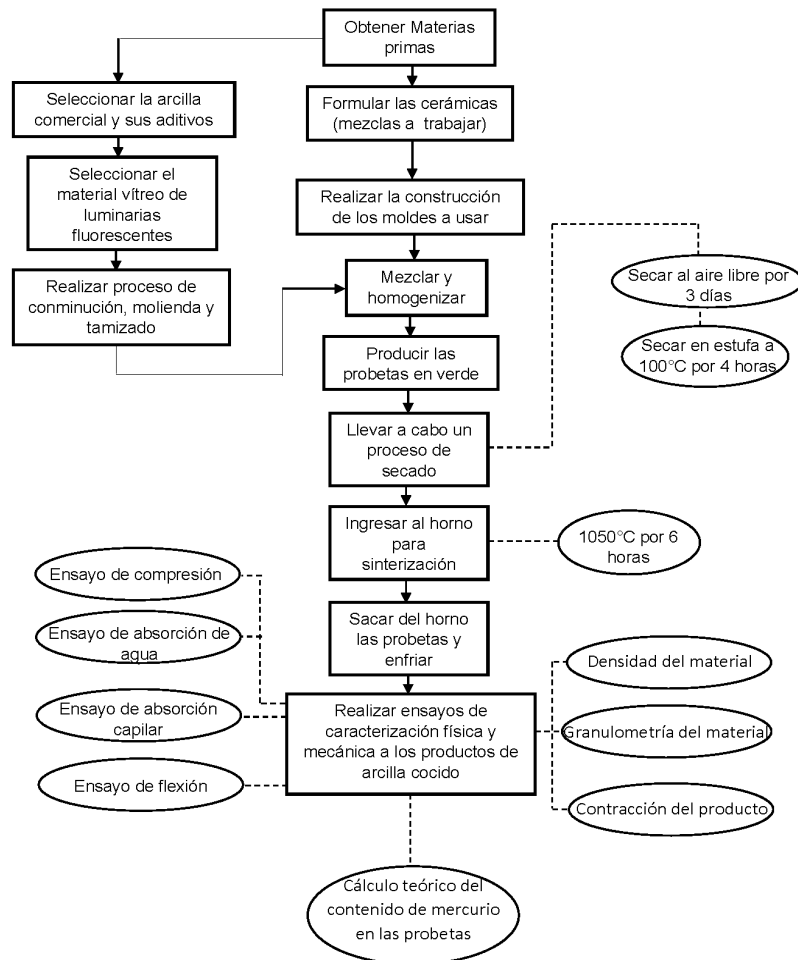
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular una mezcla cerámica de uso común en la industria local (Girón, Santander), incorporando material vítreo de forma gradual en reemplazo de materia prima virgen.
- Realizar ensayos de absorción de agua y absorción capilar para la caracterización del material cerámico producido.
- Determinar el comportamiento mecánico del material cerámico mediante ensayos de compresión y flexión.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proceso experimental se enfocó en la fabricación básica de probetas de arcilla cocida, que simulan ladrillos de arcilla cocida (producto de alfarería). En este proceso de manufactura, destacan tres etapas importantes, a saber: formulación de la mezcla de materias primas, fabricación de las probetas, cocción y la evaluación del producto terminado mediante ensayos mecánicos, de absorción de agua y otras pruebas físicas. Los pasos desarrollados en este proyecto de investigación se describen en la figura 1.

Figura 1. Esquema general del procedimiento experimental.



2.1. FORMULACIÓN DE MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS

2.1.1. Obtención y preparación de las materias primas. Se adquirió arcilla alfarera ya preparada (sin chamota), en la ladrillera ERGOS cuya mina y planta de alfarería se encuentran en el municipio de Girón (Santander). Esta arcilla preparada es la que la misma empresa emplea para la elaboración de ladrillos cocidos para construcción. Por su parte, la chamota utilizada estuvo conformada por residuos triturados de ladrillos rojos y fue adquirida en la procesadora de materiales CCN, ubicada en el municipio de Barbosa (Santander). Finalmente, el material vítreo proveniente de los residuos de las luminarias fluorescentes desechadas, se obtuvo de una empresa local, la cual se encarga de destruir estas luminarias mediante un procedimiento de trituración al vacío. Cabe destacar que, estos residuos se encuentran constituidos por dos fracciones, la primera, es el vidrio impregnado de polvos fosforados ricos en tierras raras y, la segunda, es el polvo fosforado concentrado que queda atrapado en los filtros de las máquinas trituradoras. En un trabajo previo [9], se estableció la composición de estos residuos, tal como se detalla en la tabla A1 del anexo A. A fin de establecer comparaciones, en algunas probetas, se incorporó vidrio del tipo *soda-lime*, el cual fue obtenido de botellas de bebidas (cerveza light) desechadas, y cuya composición se detalla en la tabla A2 del anexo A, tal y como fue obtenida por otro investigador [10].

En primer lugar, se tomó la arcilla de uso industrial y la chamota y se llevaron a un proceso de secado en estufa por 4 horas a 100 °C, con el fin de eliminar la humedad presente en las materias primas y de esta forma prevenir que las probetas producidas sufrieran agrietamiento durante la cocción. Posteriormente, se introdujeron en un molino en cargas de 3 kilogramos, empleando como cuerpos molidores veintitrés bolas con un tamaño variable, entre 1.3 cm y 3.8 cm de diámetro. Cada carga se procesó durante 1 hora a 40 RPM, lo cual generó un material pulverizado. Dicho material fue tamizado, en su totalidad, a través de una malla Tyler 50 (0,297 mm). Por otro lado, también se realizó un proceso de reducción de tamaño de partícula al material vítreo de las lámparas luminarias y a

los vidrios de botellas transparentes del tipo *soda lime*, siguiendo el mismo proceso realizado a la arcilla. Los polvos fosforados, dada su finura ($100\% < 0,074$ mm), no fueron sometidos a este procedimiento.

2.1.2. Granulometría de las materias primas. Se seleccionaron muestras de 100 g de cada materia prima (arcilla, chamota, vidrio de lámpara luminaria y polvo fosforado), debidamente tamizadas en pasante malla Tyler 50. Cada muestra tomada se pasó por una selección de malla Tyler 70 (0,210 mm), malla Tyler 100 (0,149 mm), malla Tyler 140 (0,105 mm), malla Tyler 170 (0,088 mm) y malla Tyler 200 (0,074), por un tiempo de 3 min por cada malla, registrando los pesos retenidos en cada una, un registro fotográfico de este proceso puede apreciarse en el anexo B. Con el fin de conocer su distribución granulométrica, se representaron los resultados, gráficamente, usando el modelo de Rosin-Rammler [24], según la ecuación (1).

$$\ln(-\ln(1 - F)) = m \times \ln(x) + b \quad \text{Ecuación (1)}$$

En donde F es la fracción acumulada pasante, x es el tamaño de partícula en micrómetros y tanto m como b son las constantes de ajuste.

2.1.3. Diseño de las mezclas. Se utilizaron las materias primas previamente acondicionadas y, a partir de éstas, se formularon ocho mezclas, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La primera muestra estuvo constituida solamente por la arcilla y se le denominó “Arcilla”. El objeto de esta mezcla fue determinar las propiedades del material base usado para confeccionar las probetas.
- La segunda muestra, denominada “Patrón”, se formuló con una composición similar a la usada en la industria para la fabricación de ladrillos cocidos para construcción civil [15].
- Las siguientes cuatro mezclas, denominadas como V1, V5, V10 y V15, se formularon sustituyendo gradualmente la arcilla por el material vítreo triturado de

las lámparas fluorescentes. Esta sustitución constituye una modificación de la muestra Patrón, con el objeto de evaluar las propiedades que surgen en las probetas al hacer la sustitución.

- Finalmente, se plantearon dos mezclas en las que se reemplazó el material vítreo de luminaria por otros materiales, una de ellas denominada SL, con la que se buscó establecer el efecto de la adición de vidrio común (*soda-lime*). Finalmente, se produjeron las probetas denominadas PF, las cuales incorporaron, solamente, la adición de polvo fosforado.

El detalle de la composición de todas estas formulaciones se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. Formulación de mezclas de las probetas cerámicas.

Componentes	Arcilla (%P/P)	Chamota (%P/P)	Vidrio Luminaria (%P/P)	Vidrio común (soda- lime). (%P/P)	Polvo Fosforado (%P/P)
Mezcla					
Arcilla	100	0	0	0	0
Patrón	80	20	0	0	0
V1	79	20	1	0	0
V5	75	20	5	0	0
V10	70	20	10	0	0
V15	65	20	15	0	0
SL	75	20	0	5	0
PF	79	20	0	0	1

2.1.4. Fabricación de los moldes. Para fabricar los ladrillos de prueba (probetas) se elaboraron dos moldes en acero, con el fin de cumplir con los requisitos establecidos para las diferentes pruebas. El primero se construyó basado en la norma ASTM C20-00 [11], para la fabricación de ladrillos para llevar a cabo ensayos

mecánicos, los cuales se denominaron como tipo A, con dimensiones de 100 mm x 50 mm x 20 mm, como se detalla en la figura C1 del anexo C. El segundo molde se elaboró según la norma ASTM C674-88 [12], con el cual se obtuvieron los ladrillos denominados tipo B, de dimensiones 100 mm x 25 mm x 12 mm, ilustrados en la figura C2 del anexo C. Los ladrillos tipo B se emplearon para los ensayos de absorción de agua y determinación de la tasa inicial de absorción (succión). Estos ladrillos tipo B también se usaron para determinar la densidad y contracción lineal del producto cocido.

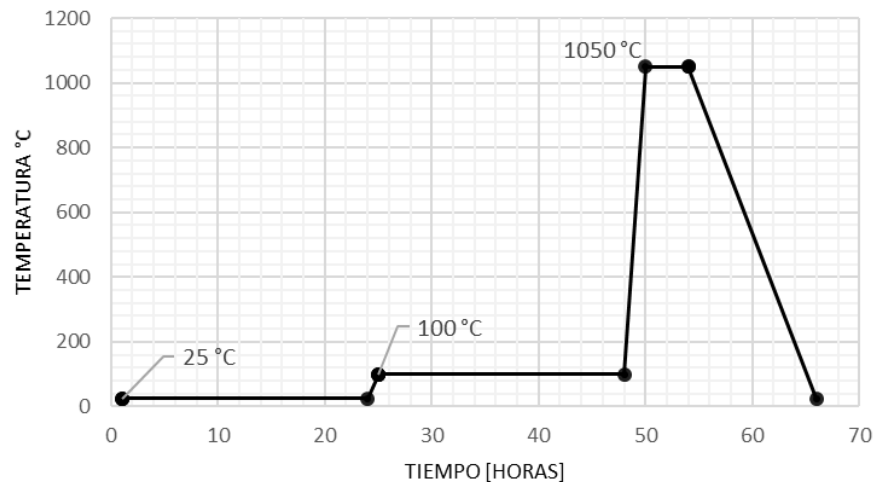
2.2. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

2.2.1. Mezcla y homogeneización. A partir de las materias primas mencionadas en la sección 2.1.1, se lleva a cabo la elaboración de las muestras, tal como se describe en la tabla 1. Se dispuso de la arcilla, la chamota y los residuos en una bandeja metálica con el fin de realizar una mezcla homogénea en seco de forma manual. Seguido a eso se añadió gradualmente agua, usando un aspersor tipo “spray” a medida que se iba amasando manualmente, hasta alcanzar 180 ± 20 ml por cada kg de mezcla. Estas condiciones permitieron una manipulación cómoda de cada muestra y su emplazamiento en el molde de las probetas. Un registro fotográfico de la preparación de las mezclas se puede apreciar en el anexo D. Para evitar defectos en la fabricación de las probetas en verde, se procedió a esparcir en el interior de los moldes una mezcla oleosa, compuesta (en volumen) por 50 % de aceite vegetal (soya) y 50 % aceite de motor usado. Posteriormente, las mezclas se vertieron en los respectivos moldes y se procedió a moldear y apisonar hasta completar la forma deseada. Por último, la probeta es removida del molde.

Con el fin de realizar ensayos de flexión, compresión, tasa de absorción inicial (succión) y absorción de agua, se fabricaron cinco probetas con las características necesarias para cada ensayo, obteniendo un total de veinte probetas por cada tipo de mezcla.

2.2.2. Proceso de secado y cocción. Las probetas en verde se secaron a temperatura ambiente durante 24 horas, luego se introdujeron a una estufa a 100 °C, permaneciendo allí por el mismo tiempo. Posteriormente, se llevaron a una mufla hasta una temperatura de sinterización de 1050°C. Una vez alcanzada esta temperatura, esta se sostuvo por un tiempo de 4 horas. El enfriamiento se llevó a cabo dentro de la mufla. La curva de cocción de las probetas se detalla en la figura 2.

Figura 2. Curva de cocción de las probetas cerámicas.



2.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

Los ensayos de caracterización física y mecánica se realizaron con base en la norma NTC 4205-1 [13], la cual establece los parámetros a los que debe estar sometidos los ladrillos de mampostería estructural. Esta norma incluye dentro de las propiedades físicas, los ensayos de resistencia mecánica a la compresión, resistencia a la flexión, absorción de agua y tasa inicial de absorción (succión). Las descripciones detalladas de los procedimientos experimentales a seguir para estos ensayos se encuentran, a su vez, en la norma NTC 4017 [14]. Tal y como se explicó en la sección 2.2.1 se fabricaron cinco probetas para cada ensayo.

2.3.1. Ensayo de compresión. Esta prueba se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NTC 4017 [14] y se llevó a cabo empleando una máquina universal SHIMADZU AG-XPLUS 25KL. Se seleccionaron los lotes de probetas con geometría tipo A de cada mezcla y se ubicaron en la máquina tal como se describe en la figura E1 del anexo E. El ensayo se condujo a una tasa de desplazamiento constante de 0,165 mm/s y se impuso como límite una carga máxima de 80 kN en el software del equipo. Para realizar el cálculo de la resistencia a la compresión, se empleó la ecuación (2), descrita en la misma norma [14].

$$C = \frac{W}{A} \quad \text{Ecuación (2)}$$

En 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].

2.3.2. Ensayo de flexión. Esta prueba se realizó con base en la norma NTC 4017 [14]. En la misma se usaron probetas con la geometría tipo A. El primer paso consistió en registrar las medidas exactas de la probeta cerámica, con el fin de calcular el módulo de ruptura establecido en la norma la cual se representa mediante la ecuación (3), de la siguiente manera:

$$MR = 3W \frac{\left(\frac{L}{2} - x\right)}{bd^2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Aquí MR es el módulo de rotura de la muestra en el plano de falla [MPa], W la carga máxima indicada por la máquina de prueba [N], L la distancia entre los soportes (medida centro a centro) [mm], b el ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla [mm], d la profundidad (distancia desde la cara superior hasta el plano de apoyo) de la muestra en el plano de falla [mm], y x la distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión [mm].

El posicionamiento la probeta sobre la respectiva máquina se detalla en el anexo G, seleccionando la cara plana (con menor número de imperfecciones) para ubicarla hacia abajo.

2.3.3. Ensayo de absorción de agua. Se desarrolló de acuerdo con la norma NTC 4017 [14]. Para esta prueba se seleccionaron los lotes probetas tipo B de cada mezcla, realizando el estudio a 40 probetas. En primer lugar, se registró el peso de cada una de las probetas secas y frías. Seguidamente, se dispusieron en diferentes recipientes plásticos llenos con agua a temperatura ambiente, en donde se mantuvieron por un tiempo de 24 horas, luego de las cuales se extrajeron de los recipientes y con un pequeño paño húmedo se les retiró el exceso de agua, con el fin de realizar registro del peso final en un tiempo no menor de 2 minutos, para poder llevar a cabo el cálculo del porcentaje de absorción, teniendo en cuenta los parámetros de la ecuación (4).

$$Absorcion, \% = 100x \frac{W_b - W_s}{W_s} \quad \text{Ecuación (4)}.$$

En donde W_b es la masa saturada del espécimen después de la inmersión en agua en [g] y W_s la masa seca del espécimen [g].

2.3.4. Ensayo de succión de agua o tasa inicial de absorción (T.I.A). De acuerdo a lo descrito en la norma NTC 4017 [14], se utilizaron las probetas con geometría tipo B, las cuales se encontraban previamente secas en una estufa a 100°C por 24 horas. Para realizar este ensayo, fue necesario adecuar una probeta de referencia, la cual se sumergió en agua durante 24 horas para garantizar que estuviera saturada con agua. Esta probeta se usa luego para determinar el volumen exacto de agua que se requiere para que cualquier otra probeta a ensayar esté sumergida en el líquido exactamente 3 mm.

El montaje experimental consistió en un recipiente plástico transparente, en cuyo fondo se colocan dos barras delgadas de acero inoxidable, ubicadas equidistantemente, las cuales actúan como soportes sobre los cuales se colocan

las probetas de arcilla. Seguidamente, el recipiente se llenó con agua a temperatura ambiente, hasta la parte superior de las barras, asegurándose que el fluido quede completamente nivelado. Luego, se situaba sobre los soportes la probeta de referencia (saturada en agua), previamente marcada a los 3 mm de altura desde su superficie inferior y se continuaba con el llenado del recipiente, hasta que el agua alcanzara dicha marca. Cada muestra ensayada se midió y se pesó, antes de ubicarla sobre los soportes sobre los soportes e, inmediatamente, al estar en contacto con el agua se mantenían por un minuto exacto. Finalizado este tiempo, se retiraban y se eliminaba el exceso de humedad con un paño húmedo, antes de registrar su peso en una balanza cuya precisión es de 10 mg. Con esta información, la tasa inicial de absorción se calculó utilizando la ecuación (5).

$$Tasa\ inicial\ de\ Absorción,\ T.I.A. = \frac{G}{A} \quad \text{Ecuación (5).}$$

En donde G es la diferencia en gramos entre los pesajes inicial y final por cada minuto [g/min] y A el es el área neta en contacto con el agua [cm²].

2.4. DENSIDAD DEL PRODUCTO

Se utilizaron 5 probetas del tipo B cocidas, las cuales se secaron en estufa a 100 °C, por 24 horas, dejándolas enfriar por 4 horas. Cada probeta se pesó y se midieron sus dimensiones con un calibrador. Se calculó el promedio de sus dimensiones (largo, alto y ancho), antes de calcular la densidad (D) de cada muestra, empleando la ecuación (6).

$$D = \frac{masa}{(alto) \times (ancho) \times (largo)} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad \text{Ecuación (6).}$$

2.5. CONTRACCIÓN LINEAL DE LAS PROBETAS DURANTE LA COCCIÓN

Se registró el largo promedio de cada una de las muestras cocidas para contrastarlo con el largo original que debería tener cada probeta de acuerdo con el molde

utilizado, en este caso se usó la probeta tipo B. El porcentaje de contracción que ha se determinó mediante la ecuación (7).

$$\%Contracción = 100x \frac{Largo\ esperado - Largo\ obtenido}{Largo\ esperado} \quad \text{Ecuación (7)}.$$

2.6. CÁLCULO TEÓRICO DEL CONTENIDO DE MERCURIO EN LAS PROBETAS

Los residuos de luminarias fluorescentes tratadas mediante trituración al vacío todavía pueden contener trazas de mercurio [3, 9, 26], por ello se calculó el contenido teórico del mercurio presente las mezclas producidas en este trabajo, de manera similar a como lo han planteado otros autores [3]. Este cálculo se realizó mediante la ecuación 8.

$$\text{Contenido Hg en la probeta [ppm]} = \frac{f_{Hg} * f_{polvo} * m_{v\ a\tilde{n}adido}}{m_{Total}} \quad \text{Ecuación (8)}.$$

En este caso, f_{Hg} es la fracción de Hg en el polvo fosforado, f_{polvo} es la fracción de polvo fosforado que contiene el vidrio de la luminaria, $m_{v\ a\tilde{n}adido}$ es la masa de vidrio de luminaria que se añade a la mezcla que conforma la probeta cerámica (expresada en miligramos), y m_{Total} la masa total de la mezcla con la que se conforma en verde la probeta cerámica (ladrillo), expresada en kilogramos.

2.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS EXUDADOS GENERADOS DURANTE LA COCCIÓN DE LAS PROBETAS

Algunas muestras cocidas presentaron en su superficie exudaciones blancas y redondeadas, similares a burbujas. Éstas se extrajeron cuidadosamente con pinza metálica, para evitar contaminarlas de arcilla cocida y se reservaron en recipientes plásticos limpios y secos. De allí se sometieron a un análisis elemental cuantitativo, usando un espectrómetro de fluorescencia de rayos-x de energía dispersiva, marca *Shimadzu* modelo *EDX-800HS* con detector de estado sólido Si (Li), colimador de

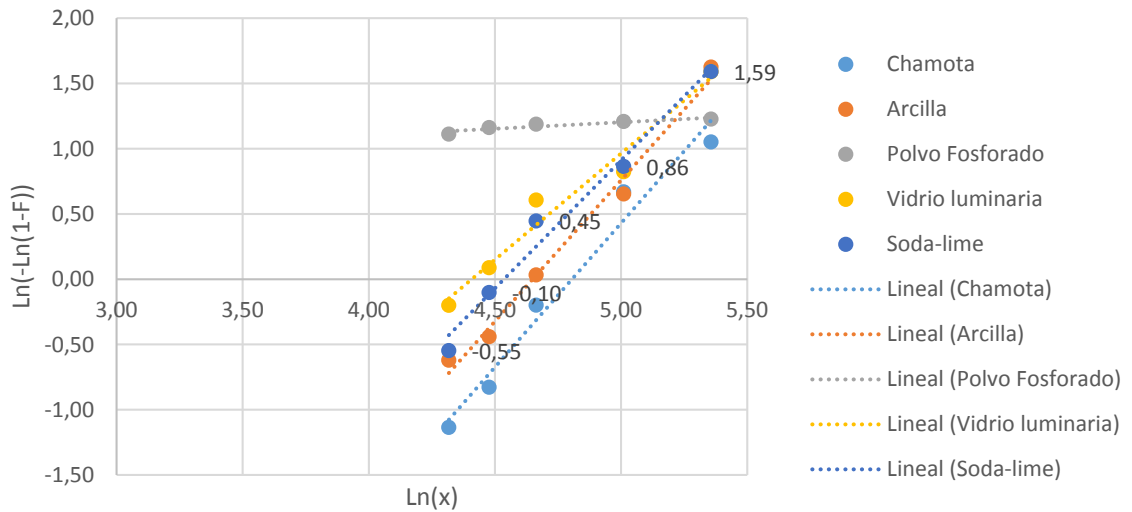
3mm y fuente de rayos-x mediante un tubo de rodio. La cuantificación se realizó con el método de los parámetros fundamentales (FP) mediante el software DXP-700E Versión 1.00 Rel. 014.

3. RESULTADOS

3.1. GRANULOMETRÍA DE LAS MATERIAS PRIMAS

En la figura 3, se observan los resultados de granulometría de las materias primas que fueron utilizadas para las distintas mezclas ensayadas, vale decir, arcilla, chamota, polvo fosforado, vidrio fosforado, vidrio de luminarias fluorescentes como se observa en la figura B del anexo B, y vidrio cullet tipo *soda-lime*. Se tiene que, el polvo fosforado, presentó una tendencia diferente con respecto al resto de los elementos estudiados. Para mayor detalle, en la tabla B del anexo B se detalla todos los datos que fueron generados por esta prueba.

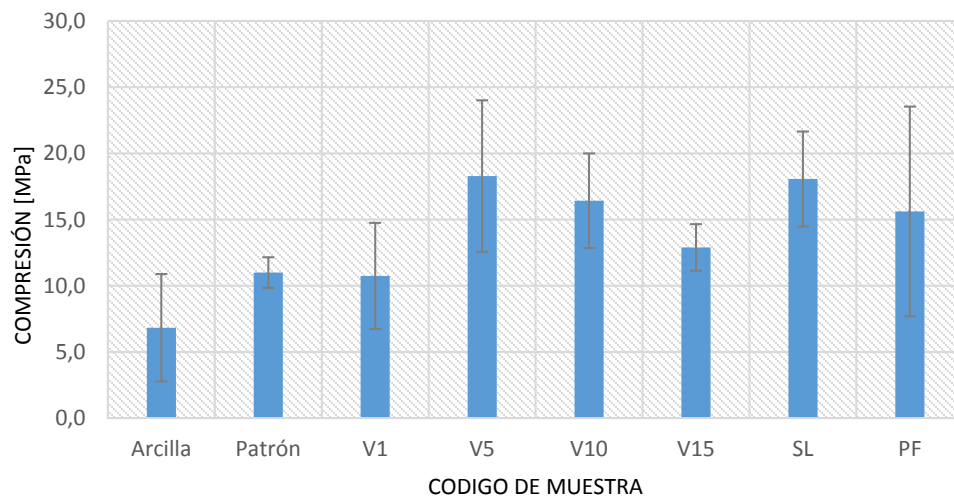
Figura 3. Gráfica de granulometría por Rosin-Rammler de las diferentes materias primas empleadas en este trabajo. El tamaño de partícula “x” viene dado en micrómetros.



3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

3.2.1. Ensayo de compresión. En la figura 4 se aprecia la gráfica de los resultados obtenidos en la prueba de compresión, para mayor detalle en el anexo E hay una imagen fotográfica de este procedimiento, incluyendo la tabla completa de resultados y el cálculo.

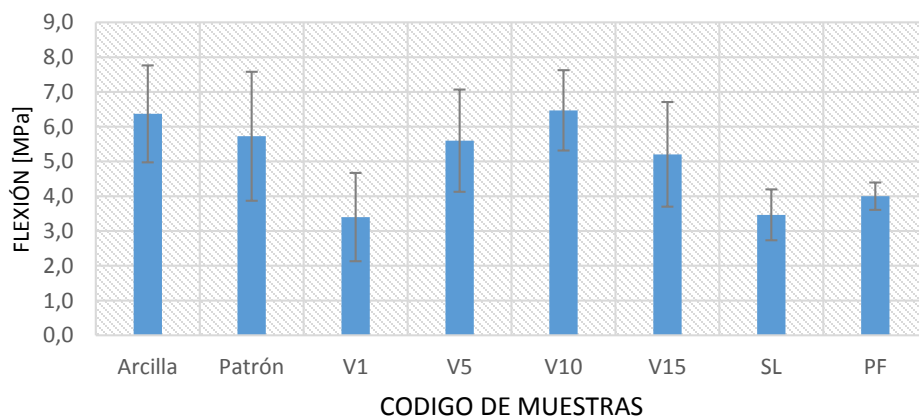
Figura 4. Gráfica del comportamiento de las probetas cerámicas al ensayo de compresión. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.



Se observa que la probeta cerámica que registró, en promedio, mayor resistencia a la compresión fue la muestra “V5”, la cual cuenta con 5% de material vítreo de lámparas fluorescentes dentro de su composición. Cabe resaltar que la muestra “SL” presentó un valor muy similar, siendo estas dos muestras las que reportaron mayores valores de resistencia a la compresión. Por otro lado, la probeta denominada “Arcilla” presentó los valores más bajos con respecto a la muestra estándar “Patrón”. Según lo establecido en la norma NTC 4205-01, presente en la tabla F del anexo F, sólo las probetas “V5, V10, SL y PF” cumplieron con los requisitos mínimos de resistencia a la compresión, para mampostería estructural y por unidad, establecidos en dicha norma [13].

3.2.2. Ensayo de flexión. Si bien en la norma NTC – 4205, la cual fue utilizada para la caracterización de las probetas cerámicas producidas en este trabajo, no exigía la realización de pruebas de flexión, este aspecto fue estudiado en este proyecto de investigación. Los resultados obtenidos se presentan en la gráfica de la figura 5, sus detalles experimentales en el anexo G, en el cual se puede apreciar una imagen del procedimiento, los valores de la gráfica y el empleo del cálculo tipo. En cuanto a los valores obtenidos para el módulo de rotura, sólo las probetas “Arcilla” y “V10” presentaron valores superiores a la muestra “Patrón”.

Figura 5. Grafica del comportamiento de las probetas al ensayo de flexión. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.

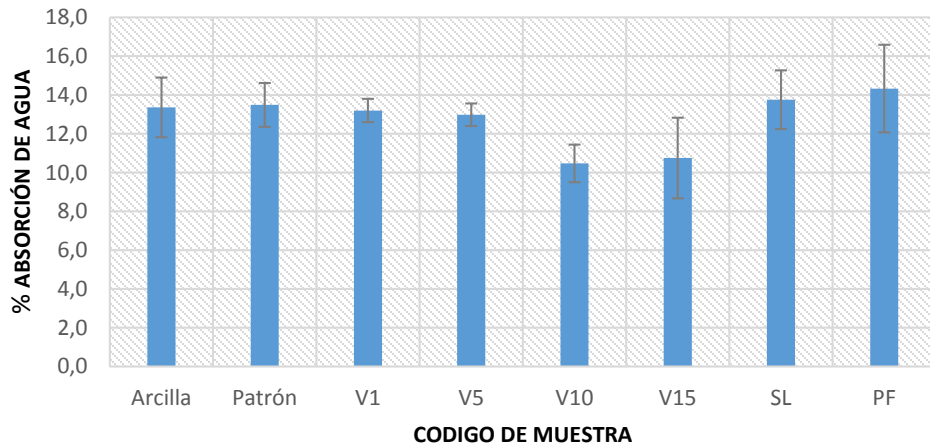


3.3. PROPIEDADES DE ABSORCIÓN DE AGUA

3.3.1. Ensayo de absorción de agua. En la figura 6, se plasman los resultados de absorción de agua para todas las probetas cerámicas. Se puede apreciar que la muestra que presentó mayor absorción de agua, fue “PF” la cual cuenta dentro de su composición con polvo fosforado.

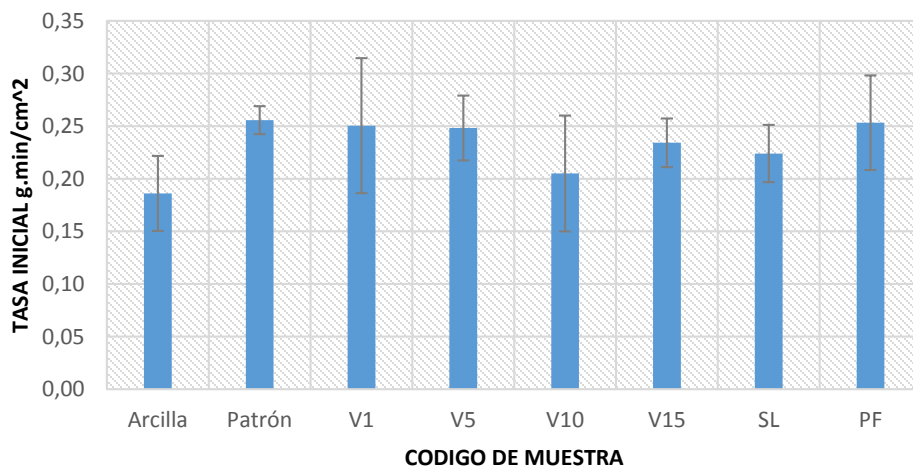
Se puede apreciar en el anexo H, una imagen fotográfica del procedimiento realizado, acompañado con la tabla de valores y el cálculo tipo. Los datos obtenidos en esta prueba también se encuentran dentro del rango determinado según la norma NTC 4205 [14], tal y como se describe en el anexo F.

Figura 6. Ensayo de absorción de agua. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.



3.3.2. Ensayo de tasa inicial de absorción (succión) T.I.A. Tal como se observa en la figura 7, todas las probetas cerámicas presentaron valores muy similares de tasa de absorción inicial a la muestra “Patrón” (cercanos a 0.25g.min/cm²).

Figura 7. Ensayo de tasa inicial de absorción (succión) T.I.A. de las probetas cerámicas producidas. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.

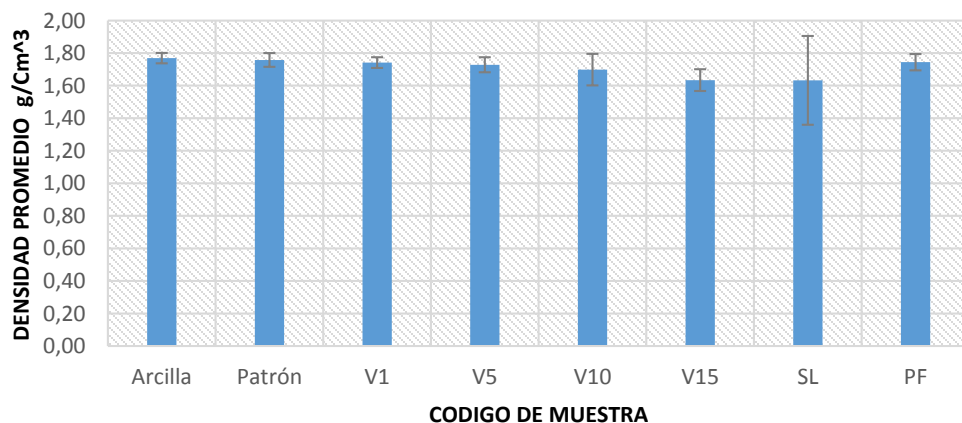


En el anexo I se puede detallar de mejor manera ya que se encuentra evidencia fotográfica, la tabla de resultados y el cálculo tipo, por otro lado, los resultados de esta prueba están dentro los rangos establecidos por la norma NTC 4205, dichos datos pueden compararse con la tabla I2 en el anexo I, indicando que son materiales aptos para mampostería estructural.

3.4. DENSIDAD DEL PRODUCTO DESPUÉS DE LA COCCIÓN

En la figura 8, se representa los valores de densidad de las diferentes probetas cerámicas, las cuales se mantuvieron muy cercanas a $1,75 \text{ g/cm}^3$ en casi todos los casos, salvo los correspondientes a la probeta “SL” y los más altos a la probeta “Arcilla”, estos resultados y el cálculo tipo se detallan en el anexo J.

Figura 8. Valores de densidad promedio de las probetas cerámicas producidas. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.

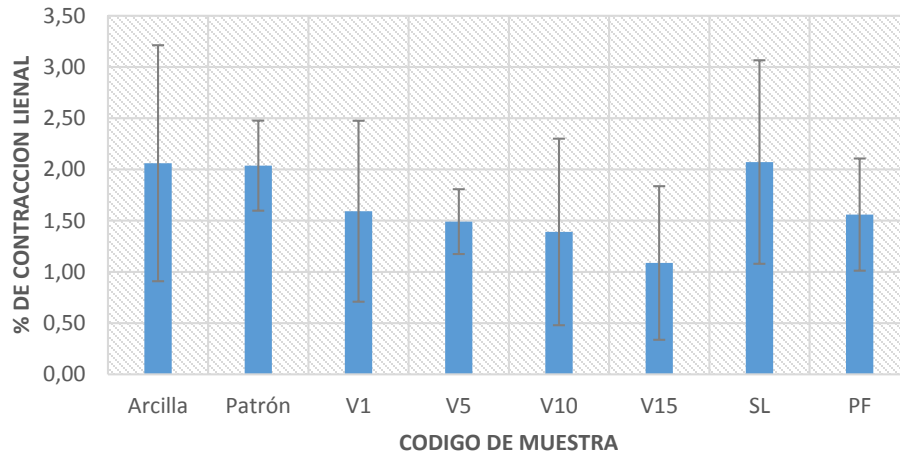


3.5. CONTRACCIÓN LINEAL DEL PRODUCTO DURANTE LA COCCIÓN

La figura 9 contiene los valores obtenidos de contracción de todas las probetas cerámicas, estos datos presentan la particularidad que, a mayor cantidad de material vítreo de lámparas de luminarias, las probetas cerámicas presentaron

mayor contracción, caso que también caracterizo a la probeta “PF”, la cual presenta mayor contracción con respecto a la muestra “Patrón”, para un mayor detalle remitirse al anexo K.

Figura 9. Porcentaje de contracción lineal del producto luego de la cocción. Las líneas de error representan la desviación estándar de cada promedio de datos.



3.6. ASPECTO VISUAL DEL PRODUCTO

El aspecto visual de los productos obtenidos luego de la cocción, se muestra en las figuras 10 y 11.

Figura 10. Aspecto visual de las probetas tipo B cocidas, para cada una de las condiciones estudiadas. Las mezclas V1, V5, V10, V15 incluyen material vítreo de luminarias fluorescentes.

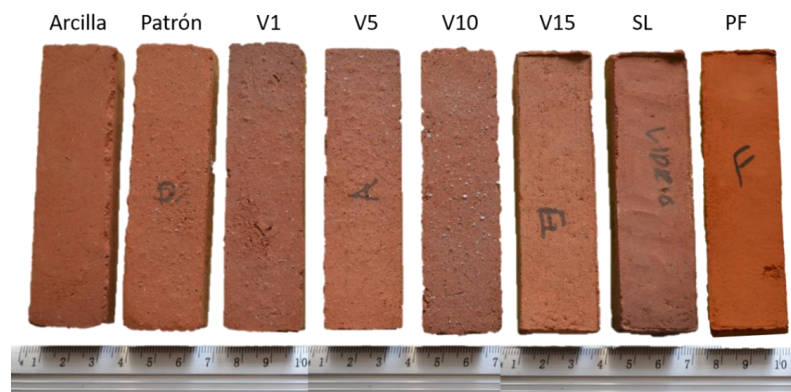
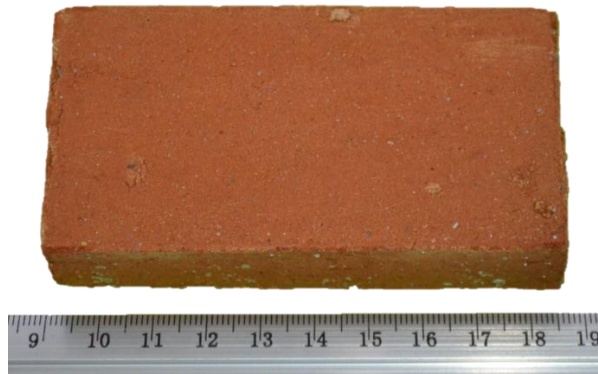


Figura 11. Aspecto visual de la probeta cerámica V5 tipo A.



Las probetas cerámicas presentaron una coloración rojiza y una reducción del largo tanto de las probetas tipo A y tipo B. Además, las muestras que contenían material vítreo de luminaria (denominadas “V1”, “V5”, “V10” y “V15”) presentaron la exudación de un material vidrioso de color blanco característica, que se presenta con mayor detalle en la figura 12 (a).

3.7. CÁLCULO TEÓRICO DEL CONTENIDO DE MERCURIO

Se calculó el contenido teórico de Hg a las probetas confeccionadas con materiales provenientes de las luminarias fluorescentes antes de la cocción. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Cantidad teórica de mercurio presente en las probetas fabricadas antes de la cocción.

Mezcla	V1 (1% vidrio luminaria)	V5 (5% vidrio luminaria)	V10 (10% vidrio luminaria)	V15 (15% vidrio luminaria)	PF (1% Polvo fosforado)
Cantidad de Hg	0,0158 ppm	0,079 ppm	0,158 ppm	0,237 ppm	1 ppm

Como resulta lógico, las mezclas con material vítreo “V1”, “V5”, “V10” y “V15” presentaron la particularidad de que, a mayor cantidad de este componente, presentaron una mayor cantidad de mercurio presente por kilogramo de muestra. Por otro lado, la probeta cerámica que presentó la mayor cantidad de mercurio por kilogramo de mezcla fue la probeta “PF” con 1 ppm de cantidad de Hg, debido a que este polvo presenta Hg en su composición [9]. Este cálculo se observa en detalle en el anexo M.

3.8. DEFECTOS DE EXUDACIÓN Y SU CARACTERIZACIÓN

En la tabla 3 se muestra la presencia o no de defectos de exudación de material vítreo, luego de la cocción de los materiales arcillosos estudiados en el presente trabajo.

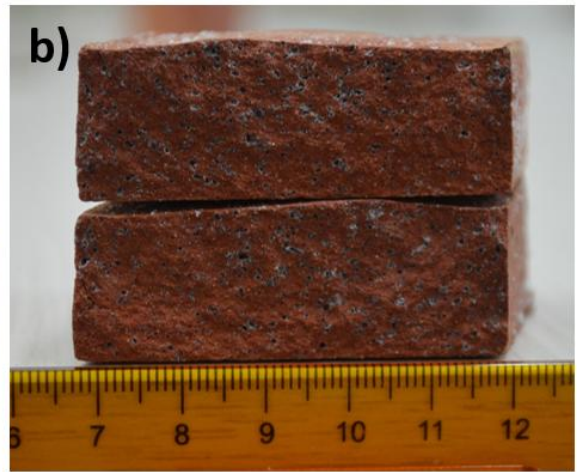
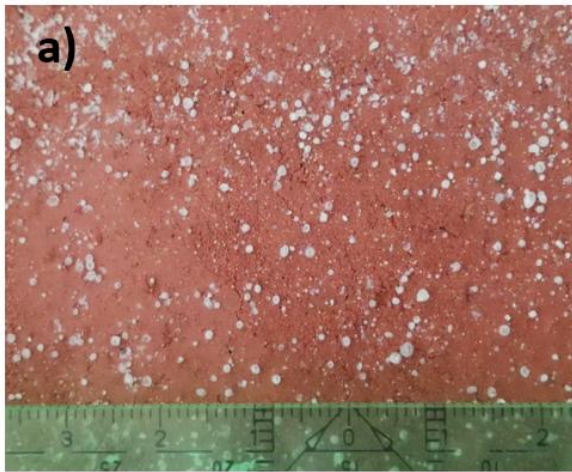
Tabla 3. Presencia o no de defectos de exudación en las probetas cerámicas producidas.

Muestra	Arcilla	Patrón	V1	V5	V10	V15	SL	PF
Exudación	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No

Las probetas cerámicas que presentaron el fenómeno de exudación fueron las que contenían material vítreo de lámpara luminaria dentro de su composición. En la figura 12 a se puede apreciar con detalle el referido defecto para una probeta de tipo V5. Los exudados observados fueron de tipo esferoidales, presentando tamaños no mayores a 1 mm de diámetro en toda la superficie de estos ladrillos. Este material de color blanco, no soluble en agua, presentó un aspecto vidrioso. Por otro lado, en la figura 12 b, en la superficie de las probetas fracturadas a flexión, se apreció la formación de halos vidriosos alrededor de burbujas huecas (poros), ubicados irregularmente en todo el interior de estas probetas. En el anexo L se muestra la tabla L, la cual contiene el análisis químico de estos exudados, confirmándose que están constituidos en más de un 80% por sílice, lo que corrobora

el carácter vítreo de este material, también se observan componentes importantes tales como óxido de calcio en un 6,99%, óxido de aluminio en 5,20%, óxido de potasio en un 2,28% y 0,73 % de óxido de plomo.

Figura 12. a) Superficie de la probeta cerámica V5, en la que se aprecia la presencia de exudados blancos de material vítreo. b) Interior probeta cerámica V5 (superficie de fractura), en la que se aprecian halos vítreos alrededor de los poros.

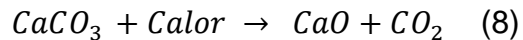


4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con las gráficas de Rosin Ramler mostradas en la figura 3, la granulometría de las materias primas (arcilla, chamota, vidrio *soda-lime* y vidrio de luminaria) presentan una distribución de tamaño de partícula bastante uniforme, indicativo de que en cada una de las mallas usadas se retuvieron cantidades similares de material [16,17]. La excepción a esto fue el polvo fosforado, el cual, al ser tan fino, queda casi que, en toda su totalidad en mallas de menor tamaño, generando así un cambio de pendiente importante. Si bien es cierto que la arcilla presenta un tamaño intermedio, entre los vidrios y la chamota, este resultado debe tomarse con cuidado, en vista de que las arcillas tienden a aglomerarse durante el análisis granulométrico por tamizado, por lo que su determinación de tamaños debe hacerse mediante otras técnicas, tales como sedimentría láser [18,19]. Por otro lado, la materia prima con mayor tamaño de partícula es la chamota, la cual es utilizada como aditivo “desengrasante”, es decir, ahorrador de arcilla en el proceso industrial de confección de ladrillos [20].

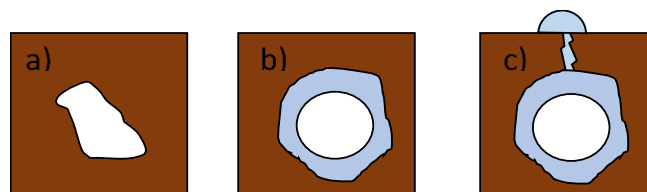
La incorporación de residuos vítreos de luminarias a las probetas cerámicas, hace que mejoren los valores registrados de la resistencia a la compresión, con respecto valor que arroja la mezcla tradicional (ladrillo tradicional o patrón), lo cual se puede apreciar en la figura 4. No obstante, debe tenerse en cuenta que, tal y como muestran las desviaciones estándar de estas medidas (barras de error), estas mejoras no son del todo significativas, estadísticamente hablando, en vista de que la mayoría de las barras de error se encuentran yuxtapuestas, para todas las condiciones analizadas. De igual forma, se aprecia que la arcilla sola no presenta buena resistencia a la compresión y, en todos los casos, la adición de cargas “desengrasantes”, tales como la chamota, u otros residuos en el sistema, siempre tiende a mejorar la resistencia a la compresión del material base, con el cual se confeccionaron todas las probetas cerámicas estudiadas en el presente trabajo. Este fenómeno ha sido observado por otros autores [21,22,23], al incorporar

residuos de diversa índole en ladrillos cocidos de arcilla. Esto puede justificarse, debido a que en el interior de la probeta cerámica los agregados tienden a amortiguar los esfuerzos al momento de aplicar cargas de compresión. Esto es particularmente cierto en el caso de las adiciones de vidrio de luminarias, las cuales tienden a generar poros rodeados de vidrio, como se muestran en la figura 12, que pueden actuar como frenos a la propagación de grietas formadas durante la compresión. El mecanismo mediante el cual se forman estos poros cubiertos por halos vítreos es incierto, y no ha sido descrito por otros autores que han trabajado con materiales muy similares a los usados en este trabajo [3]. No obstante, debido a las características de estas porosidades y al contenido de carbonato cálcico en el vidrio de las luminarias [25], es posible que durante la cocción se libere CO_2 gaseoso, tal y como se muestra en la ecuación (8).



Este gas, al quedar ocluido en el material como consecuencia de la fusión parcial del vidrio, genera los halos vítreos y la fuga de vidrio hacia la periferia de la pieza por un efecto de sobrepresión. El mecanismo que se especula en esta sección, se muestra en la figura 13.

Figura 13. Posible mecanismo para la formación de poros con halos vítreos y defectos de exudación superficial en las probetas que incorporaron vidrio de luminarias fluorescentes. (a) Partícula de vidrio en la mezcla, la cual al fundir y generar gas produce burbujas como en (b), que, a su vez, al producir sobrepresión, hacen que el vidrio líquido migre por grietas llegando a la superficie, generando así exudaciones vítreas en la superficie del producto.



Este mecanismo de formación de porosidades es concordante con los resultados de contracción longitudinal del producto, mostrado en la figura 9, en las cuales todas las probetas que se produjeron incorporando vidrio de luminarias, mostraron una menor contracción durante la cocción, indicando que este aditivo coadyuva en el mantenimiento dimensional del material a lo largo de su procesamiento [3]. Cabe destacar, además, que la densidad del producto final no se vio afectada en gran medida por ninguno de los aditivos agregados (Figura 8), lo que puede deberse a que el aporte de la arcilla en estas mezclas es un factor determinante y que el resto de aditivos y sus granulometrías tienden a compensarse entre sí.

En la figura 5 se muestra la resistencia a la flexión de estos productos cerámicos. Las normas colombianas usadas en este trabajo no exigen valores de flexión particulares para estos materiales, pero, de acuerdo con [3], las normas brasileñas exigen valores por encima de 2,0 MPa para ladrillos no estructurales, 5,5 MPa para ladrillos perforados y 6,5 MPa para tejas. Entonces, los productos ensayados cumplen al menos con el mínimo por norma y solamente el producto V10, en promedio, puede emplearse para aplicaciones de tejados. Estos mismos investigadores [3] lograron obtener variaciones de resistencia a la flexión, entre 2 y 20 MPa, para diferentes sustituciones de vidrio de luminarias en ladrillos de arcilla (productos alfareros). Con respecto a las propiedades de absorción de agua de los materiales producidos, se aprecia que en las figuras 6 y 7, todos los materiales se comportan de forma similar, únicamente observándose una menor absorción a medida que se agrega más vidrio de luminaria en las mezclas, quizás por la mayor formación de poros cerrados en la estructura, rodeados de halos vítreos (ver figura 12 b.).

Finalmente, debe tenerse atención a las posibles fuentes de contaminación por metales pesados en las que se incurre con este tipo de materiales. Si bien, en este trabajo no se hizo mayor hincapié en este aspecto, el cálculo teórico de Hg en el producto hace que, durante la cocción, momento en el que se puede vaporizar este metal, los equipos industriales a emplear deben poseer sistemas de filtración

adecuados para retener los gases mercuriales. Adicionalmente, de acuerdo al anexo L, las exudaciones de los ladrillos compuestos por luminarias fluorescentes contienen una cierta cantidad de plomo, lo cual obliga a realizar pruebas de lixiviación, para establecer la posible toxicidad final del producto obtenido.

5. CONCLUSIONES

Luego del análisis de los resultados obtenidos y bajo las condiciones experimentales empleadas en el presente trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se lograron producir materiales cerámicos basados en arcilla, similares a ladrillos alfareros tradicionales, incorporando productos vítreos provenientes de residuos de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes y vidrio *soda-lime* reciclado.
- Estos productos cumplieron con las normas NTC 4205 en lo referente a las propiedades de resistencia a la compresión y absorción de agua. Con respecto a la resistencia a la flexión, los productos cumplen, al menos, con las propiedades exigidas por las normas brasileñas para bloques de arcilla cocida no estructurales.
- Al sustituir en los productos vidrio triturado de luminarias fluorescentes se encontraron defectos superficiales de tipo exudación, los cuales pueden explicarse dada la presencia de carbonato cálcico en el residuo empleado.
- La presencia de mercurio y plomo en estos productos debe estudiarse con detenimiento, en vista de que ambos elementos podrían hacer tóxico el producto. Este análisis debe abordarse en futuras investigaciones.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Medio ambiente, Revista Dinero Online (2016, mayo 16). “¿Qué hace con los bombillos que ya no usa?”. [Online]: <http://www.dinero.com/pais/articulo/como-reciclar-bombillos-fundidos-en-colombia-con-la-corporacion-lumina/223800>.

[2] Coordinación general de minería, Secretaria General, Dirección general de desarrollo minero, México (2014, diciembre). “Perfil de Mercado del Feldespato”. [Online]:http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_feldespatos_2014.pdf.

[3] Morais, A, Vieira, C, Rodriguez, R, Monteiro, S, Candido, V, & Ferreira, C 2016, “Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic: A Perfect Solution”, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 68, no. 9, p. 2425. Available from: 10.1007/s11837-016-1985-z. [8 May 2017].

[4] Vieira, C. M. F., Morais, A. S. C., Monteiro, S. N., & Delaqua, G. C. G. “Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. Cerâmica”, *Cerâmica São Paulo* v. 62, n. 364, p. 376-385, Dic, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642035> [Accedido: 8-May-2016].

[5] Andreola F., Barbieri L. & Lancellotti I., “End of life-materials: WEEE glass recovery in construction sector”, en *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2010.

[6] Mardegan L., T., Morais, A. S. C., Vieira, C. M. F., Candido, V. S., Monteiro, S. N., “Microstructural Analysis of Clayey Ceramics Incorporated with Fluorescent Lamp Glass Waste”, *Materials Science Forum*, Vol. 820, pp. 468-473, 2015.

[7] Morais, A. S. C., Monteiro, S. N., Ribeiro, S., Sardinha, L. C., Vieira, C. M. F., “Study of Wettability of Clayey Ceramic and Fluorescent Lamp Glass Waste

Powders”, Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015”, pp 681-686, 2016.

[8] Morais, A. S. C., Da Costa Caldas, T. C., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., "Characterization of Fluorescent Lamp Glass Waste Powders", Materials Science Forum, Vols. 727-728, pp. 1579-1584, 2012.

[9] Amaya, G, Vitrificación del residuo obtenido a partir de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.

[10] Forero, B. Vitrificación de los contenidos internos de pilas desechadas del tipo li-ion: una opción de reciclaje, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2016.

[11] 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).

[12] Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials, ASTM C674 - 88(1999).

[13] Norma Técnica Colombiana, Unidades De Mampostería De Arcilla Cocida, Ladrillos Y Bloques Cerámicos, NTC 4205-1(2009).

[14] Norma Técnica Colombiana Métodos Para Muestreo Y Ensayos De Unidades De Mampostería Y Otros Productos De Arcilla, NTC 4017(2005).

[15] Duggal, S. K., *Buildings materials*. NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS, Third revised edition. New Delhi, India. 2008.

[16] Gomez Z, H. J., Experimental and numerical investigation of the fluid-solid separation in curved open channels. (2017).

[17] Xia, Y., Shi, Y., Lin, L., Zhang, Y., Tan, Q., & Yang, Y., Experimental Evaluation of Fragments from TBM Disc Cutting under Different Load Cases. Periodica

Polytechnica Civil Engineering, 62(3), 746-756. (2018). [Online]: <https://doi.org/10.3311/PPci.11961>

[18] Ramaswamy, V., & Rao, P. S.. "Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques". Journal Of Coastal Research, 1000. doi:10.2112/04-0162.1, (2006).

[19] Wojnárovitsné Hrapka, I., & Lenkel, M. "Particle size distribution of typical ceramic raw materials by laser granulometry [microform]" / by Ilona Hrapka Wojnarovitsne and Maria Lenkel. Washington, D.C. : National Aeronautics and Space Administration, [1984].

[20] Clop García X. "Extensión, cambios y perduración en las 'formas de hacer': La producción de cerámica y el uso de desengrasantes añadidos". [serial online]. 2012. Available from: RACO, Ipswich, MA. Accessed May 3, 2018.

[22] Álvarez, J. L., Urrutia, F., Lecusay, D., & Fernández, A.. "Morteros de albañilería con escombros de demolición". Materiales De Construcción, Vol 47, Iss 246, Pp 43-48 (1997), (246), 43, (1997).

[23] Fernández, E. "Aplicación de residuos en la fabricación de morteros industriales.". Universidad de Córdoba, UCOPress, 2016. TDX, EBSCOhost (accessed May 3, 2018).

[24] Álvarez, B. "Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaños de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de bond". Universidad de Oviedo, Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, (2010). [Online]: <http://hdl.handle.net/10651/12877>.

[25] Gomez, E. J., "Recuperación de componentes valiosos a partir de luminarias fluorescentes desechadas". Universidad Industrial de Santander, Facultad e Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Materiales, (2017).

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, B. "Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaños de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de bond". Universidad de Oviedo, Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, (2010). [Online]: <http://hdl.handle.net/10651/12877>.

Álvarez, J. L., Urrutia, F., Lecusay, D., & Fernández, A.. "Morteros de albañilería con escombros de demolición". *Materiales De Construccion*, Vol 47, Iss 246, Pp 43-48 (1997), (246), 43, (1997).

Amaya, G, Vitricación del residuo obtenido a partir de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2017.

Andreola F., Barbieri L. & Lancellotti I., "End of life-materials: WEEE glass recovery in construction sector", en *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2010.

Clop García X. "Extensión, cambios y perduración en las 'formas de hacer': La producción de cerámica y el uso de desengrasantes añadidos". [serial online]. 2012. Available from: RACO, Ipswich, MA. Accessed May 3, 2018.

Coordinación general de minería, Secretaria General, Dirección general de desarrollo minero, México (2014, diciembre). "Perfil de Mercado del Feldespato". [Online]:http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_feldespat_2014.pdf.

Duggal, S. K. *Buildings materials*. NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS, Third revised edition. New Delhi, India. 2008.

Fernández, E. "Aplicación de residuos en la fabricación de morteros industriales.". Universidad de Córdoba, UCOPress, 2016. TDX, EBSCOhost (accessed May 3, 2018).

Forero, B. Vitrificación de los contenidos internos de pilas desechadas del tipo li-ion: una opción de reciclaje, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2016.

Gomez, E. J., "Recuperación de componentes valiosos a partir de luminarias fluorescentes desechadas". Universidad Industrial de Santander, Facultad e Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Materiales, (2017).

Gomez Z, H. J., Experimental and numerical investigation of the fluid-solid separation in curved open channels. (2017).

Mardegan Louzada, T., Morais, A. S. C., Vieira, C. M. F., Candido, V. S., Monteiro, S. N., "Microstructural Analysis of Clayey Ceramics Incorporated with Fluorescent Lamp Glass Waste", *Materials Science Forum*, Vol. 820, pp. 468-473, 2015.

Medio ambiente, Revista Dinero Online (2016, mayo 16). "¿Qué hace con los bombillos que ya no usa?". [Online]: <http://www.dinero.com/pais/articulo/como-reciclar-bombillos-fundidos-en-colombia-con-la-corporacion-lumina/223800>.

Morais, A. S. C., Da Costa Caldas, T. C., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., "Characterization of Fluorescent Lamp Glass Waste Powders", *Materials Science Forum*, Vols. 727-728, pp. 1579-1584, 2012.

Morais, A. S. C., Monteiro, S. N., Ribeiro, S., Sardinha, L. C., Vieira, C. M. F., "Study of Wettability of Clayey Ceramic and Fluorescent Lamp Glass Waste Powders", *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*", pp 681-686, 2016.

Morais, A, Vieira, C, Rodriguez, R, Monteiro, S, Candido, V, & Ferreira, C 2016, "Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic: A Perfect Solution", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 68, no. 9, p. 2425. Available from: 10.1007/s11837-016-1985-z. [8 May 2017].

Norma Técnica Colombiana Métodos Para Muestreo Y Ensayos De Unidades De Mampostería Y Otros Productos De Arcilla, NTC 4017(2005).

Norma Técnica Colombiana, Unidades De Mampostería De Arcilla Cocida, Ladrillos Y Bloques Cerámicos, NTC 4205-1(2009).

Vieira, C. M. F., Morais, A. S. C., Monteiro, S. N., & Delaqua, G. C. G. "Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. *Cerâmica*", *Cerâmica São Paulo* v. 62, n. 364, p. 376-385, Dic, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642035> [Accedido: 8-May-2016].

Ramaswamy, V., & Rao, P. S.. "Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques". *Journal Of Coastal Research*, 1000. doi:10.2112/04-0162.1, (2006).

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).

Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials, ASTM C674 - 88(1999).

Xia, Y., Shi, Y., Lin, L., Zhang, Y., Tan, Q., & Yang, Y., Experimental Evaluation of Fragments from TBM Disc Cutting under Different Load Cases. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3), 746-756. (2018). [Online]: <https://doi.org/10.3311/PPci.11961>

Wojnárovitsné Hrapka, I., & Lenkel, M. "Particle size distribution of typical ceramic raw materials by laser granulometry [microform]" / by Ilona Hrapka Wojnarovitsne and Maria Lenkel. Washington, D.C. : National Aeronautics and Space Administration, [1984].

ANEXOS

Anexo A. Composición química del polvo fosforado y el vidrio.

En las tablas A1 y A2 se presentan las composiciones químicas del polvo fosforado y del vidrio soda lime utilizados en la fabricación de las mezclas.

Tabla A1. Análisis FRX de la muestra de polvo fosforado, tomado de [9].

Elemento, % en peso													
Al	Ba	Ca	Ce	Cl	Cr	Cu	Eu	Fe	Hg	K	La	Mg	Mn
6,8 0	1,36	21,6 1	2,7 7	0,4 7	-	0,0 2	1,4 8	0,1 7	0,0 1	2,1 5	2,15	0,3 1	0,4 0
Na	P	Pb	Rb	S	Sb	Si	Sr	Tb	Ti	W	Y	Zn	Zr
-	10,3 7	0,02	-	0,0 7	0,3 5	1,2 4	1,1 3	1,0 0	0,0 2	0,0 7	12,2 9	0,0 5	-

Tabla A2. Análisis FRX de la muestra de vidrio cullet, tomado de [10].

Elemento, % Peso										
Si	Na	Ca	Al	K	Mg	Fe	S	Ti	Cl	
32,72	11,08	8,62	0,84	0,44	0,26	0,09	0,07	0,04	0,02	
Zr	Pb	Sr*	P*	Zn*	Cu*	Cr*	Ni*	Rb*		
0,01	0,01	85	64	45	41	40	20	9	-	-

* Elementos minoritarios dados en partes por millón (mg/Kg).

Anexo B. Granulometría se las materias primas.

En la figura B se presentan un registro fotográfico del estudio granulométrico realizado al vidrio de luminaria, así mismo en la tabla B se presenta la tabla con los valores obtenidos de la granulometría de todas las materias primas.

Figura B. Granulometría del vidrio de luminaria.



Tabla B. Resultados de granulometría por el método de Rosin rammler.

Nombre	No. De malla	Micrómetros (μm)	Peso retenido (g)	% Peso retenido	% Retenido acumulado	F*100 =% Acumulado pasante	F	Ln(x)	Ln(-Ln(1-F))
Chamota	70	212	5,72	5,72	5,72	94,28	0,94	5,36	1,05
	100	150	8,48	8,49	14,21	85,79	0,86	5,01	0,67
	140	106	29,84	29,86	44,07	55,93	0,56	4,66	-0,20
	170	88	20,51	20,52	64,60	35,40	0,35	4,48	-0,83
	200	75	7,93	7,94	72,53	27,47	0,27	4,32	-1,14
	>200		27,45	27,47	100,00				
	Total		99,93						

Arcilla	70	212	0,62	0,62	0,62	99,38	0,99	5,36	1,63
	100	150	13,99	14,02	14,65	85,35	0,85	5,01	0,65
	140	106	20,88	20,93	35,58	64,42	0,64	4,66	0,03
	170	88	16,90	16,94	52,52	47,48	0,47	4,48	-0,44
	200	75	5,88	5,89	58,41	41,59	0,42	4,32	-0,62
	>200		41,49	41,59	100,00	0,00			
	Total			99,76					
Polvo Fosforado	70	212	3,30	3,30	3,30	96,70	0,97	5,36	1,23
	100	150	0,22	0,22	3,52	96,48	0,96	5,01	1,21
	140	106	0,24	0,24	3,76	96,24	0,96	4,66	1,19
	170	88	0,34	0,34	4,10	95,90	0,96	4,48	1,16
	200	75	0,68	0,68	4,78	95,22	0,95	4,32	1,11
	>200		95,21	95,22	100,00	0,00			
	Total			99,99					
Vidrio de luminaria	70	212	0,73	0,74	0,74	99,26	0,99	5,36	1,59
	100	150	9,34	9,51	10,25	89,75	0,90	5,01	0,82
	140	106	5,64	5,74	16,00	84,00	0,84	4,66	0,61
	170	88	17,26	17,58	33,57	66,43	0,66	4,48	0,09
	200	75	10,35	10,54	44,11	55,89	0,56	4,32	-0,20
	>200		54,88	55,89	100,00	0,00			
	Total			98,20					

Anexo C. Moldes de las probetas cerámicas.

Figura C1. a) Geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo A. b) Geometría del ladrillo tipo A.

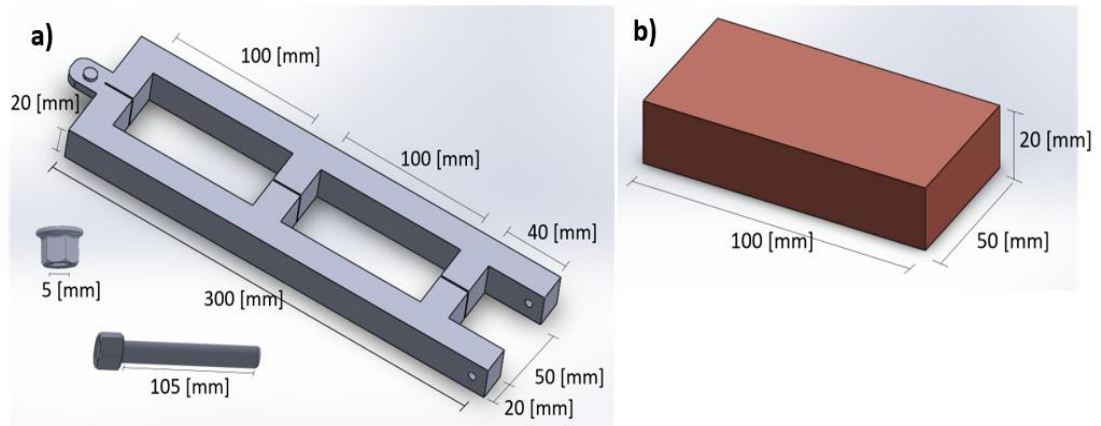
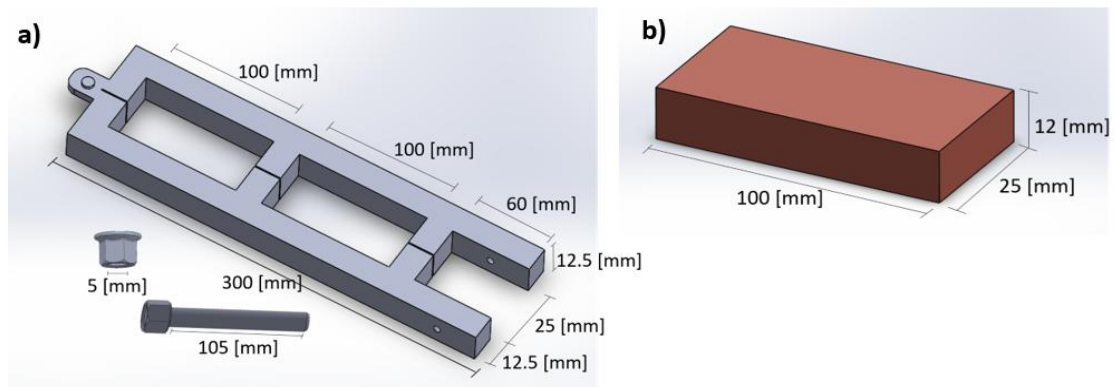


Figura C2. a) Geometría del molde usado en la fabricación del ladrillo tipo B. b) Geometría del ladrillo tipo B.



Anexo D. Preparación de las mezclas.

En la imagen D se presentan un registro fotográfico de la preparación de las mezclas.

Figura D. Preparación de las mezclas: A. materias primas, B. mezcla y homogeneización de las materias primas, C. adición de agua, D. mezcla lista para el conformado.



Anexo E. Ensayo de compresión.

En la figura E1, se representa la geometría teórica del ensayo de compresión a realizarse y en la figura E2, se observa una imagen fotográfica del procedimiento del ensayo de compresión, así mismo en la tabla E se presentan todos los valores obtenidos en esta prueba.

Figura E1. Geometría del ensayo de compresión a) Posición de la probeta cerámica para realizar la prueba. b) Esquema de la probeta sobre el equipo.

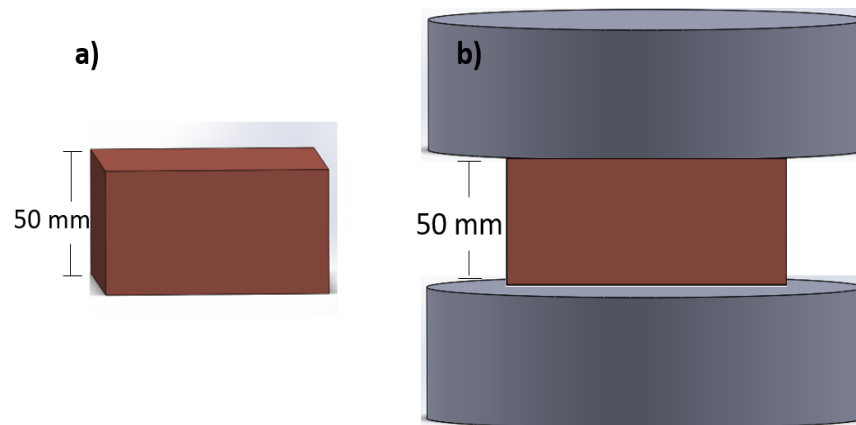


Figura E2. Prueba de compresión sobre la probeta cerámica tipo A.



Utilizando los resultados del ensayo No. 1 de la muestra “Arcilla” se utiliza la carga máxima que soportó esta probeta y se calcula el área en el cual fue aplicada dicha carga aplicando la ecuación (2) para obtener el resultado de resistencia a la compresión.

W= 5120 N

Carga máxima registrada

A= 97 mm x 18 mm

Área de aplicación de la carga

$$\text{Resistencia a la compresión, } C = \frac{W}{A} = \frac{5120 \text{ N}}{(97 \times 18) \text{ mm}^2} = 2,93 \text{ Mpa}$$

Tabla E. Resultados del ensayo de compresión.

Muestra \ Ensayo	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación	Desviación
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	Estándar	Estándar (%)
Arcilla	2,9	12	6	9,9	3,2	6,8	4,1	59,4
Patrón	9,8	11,6	12,6	10	11	11	1,2	10,5
V1	13	11,1	16	6,4	7,3	10,7	4	37,3
V5	13,8	11,2	23,5	18,9	24,0	18,3	5,7	31,3
V10	18,6	18,7	19,6	11,8	13,4	16,4	3,6	21,7
V15	12	12,2	14,1	10,9	15,3	12,9	1,8	13,6
SL	22,7	21,1	15,3	16,4	14,9	18,1	3,6	19,9
PF	22,8	22,3	4,8	10	18,1	15,6	7,9	50,7

Anexo F. Tabla de compresión y absorción de agua (norma NTC 4205-1).

La tabla F fue tomada de la norma NTC 4205, la cual presenta las propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.

Tabla F. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.

Tipo	Resistencia mínima a la compresión		Absorción de agua máxima en %			
	MPa [Kgf/cm ²]		Interior *		Exterior	
	Prom. U	5 Unidad	Prom. U	5 Unidad	Prom. U	5 Unidad
PH	5.0 (50)	3.5 (35)	13	16	13.5	14
PV	18.0 (180)	15.0 (150)	13	16	13.5	14
M	20.0 (200)	15.0 (150)	13	16	13.5	14

Anexo G. Ensayo de flexión.

En la figura G es una imagen fotográfica del procedimiento del ensayo de compresión, así mismo en la tabla G se presentan todos los valores obtenidos en esta prueba.

Figura G. Prueba de compresión sobre la probeta cerámica tipo A.



Tomando la probeta ensayada No. 2 de la muestra de “Arcilla” se usan los datos de la carga máxima aplicada al momento de ruptura, las dimensiones de la probeta y de los soportes en el cual se empleó este ensayo, así como también la distancia de ruptura tomada desde el centro de la probeta cerámica para aplicar la ecuación (3) y conocer el módulo de ruptura.

$W = 1005 \text{ N}$

Carga máxima registrada al momento de ruptura

$L = 71 \text{ mm}$ (distancia entre los soportes)

$d = 17 \text{ mm}$ (profundidad)

$b = 50 \text{ mm}$ (ancho neto)

$x = 4 \text{ mm}$ (distancia promedio del plano de falla)

$$MR = 3W \frac{\left(\frac{L}{2} - x\right)}{bd^2} = 3x(1005N)x \frac{\left(\frac{71\text{ mm}}{2} - 4\text{ mm}\right)}{50\text{ mm}x(17\text{ mm})^2} = 6,57\text{ MPa}$$

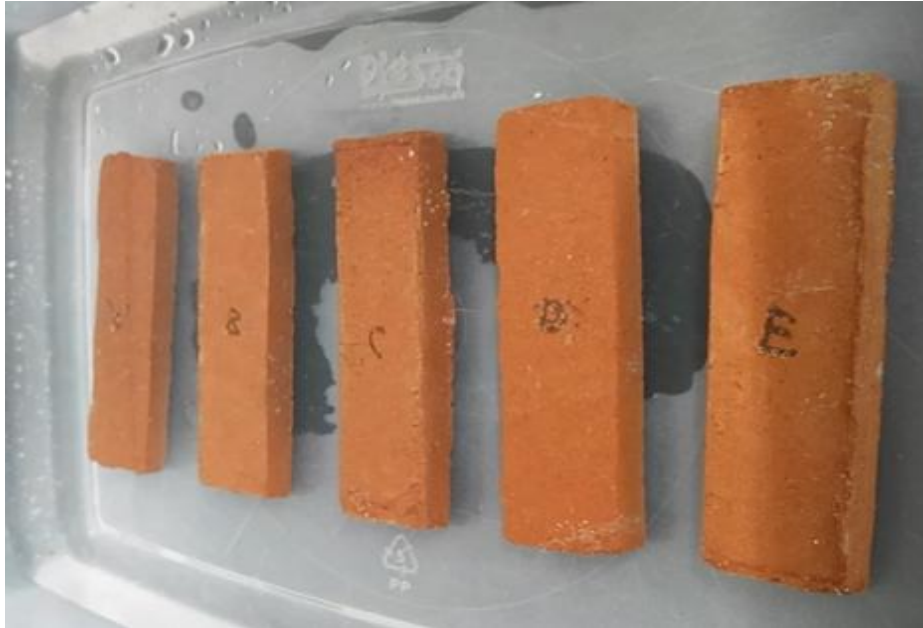
Tabla G. Resultados de las pruebas de flexión.

Muestra \ Ensayo	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación	Desviación
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	Estándar	Estándar (%)
Arcilla	---	6,57	6,59	6,00	3,64	5,7	1,4	24,5
Patrón	4,32	5,97	6,30	6,46	2,70	5,1	1,6	31,4
V1	---	1,81	---	3,88	2,98	2,9	1,0	36,0
V5	3,58	5,08	4,40	4,80	6,92	5,0	1,2	25,0
V10	6,14	5,05	6,95	---	4,59	5,7	1,1	18,7
V15	4,03	3,32	6,88	5,51	3,94	4,7	1,4	30,4
SL	---	3,80	3,11	2,16	---	3,0	0,7	22,2
PF	---	3,95	3,58	3,53	3,01	3,5	0,4	11,0

Anexo H. Ensayo de absorción de agua.

en la figura H se presenta registro fotográfico de la prueba de absorción de agua realizada a las probetas tipo B y en la tabla H los resultados obtenidos.

Figura H. Prueba de absorción de agua con probetas cerámicas tipo B.



Tomando el ensayo 1 de la muestra de “Arcilla” se usa el peso antes de la prueba y después de la prueba para aplicar la ecuación (4) y así obtener la absorción de agua.

$$W_b = 63,25 \text{ g}$$

$$W_s = 56,16 \text{ g}$$

$$\text{Absorción, \%} = 100 \times \frac{63,25 \text{ g} - 56,16 \text{ g}}{56,16 \text{ g}} = 12,6 \text{ g}$$

Tabla H. Resultados del ensayo de absorción de agua.

Muestra \ Ensayo	Ensayo					Promedio (%)	Desviación Estándar	Desviación Estándar (%)
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)			
Arcilla	12,6	16,1	12,4	12,9	12,8	13,4	1,5	11,5
Patrón	12,9	12,2	13,1	14,1	15,1	13,5	1,1	8,4
V1	12,3	13,7	13,7	12,9	13,4	13,2	0,6	4,6
V5	13,2	12,3	13	12,6	13,8	13	0,6	4,5
V10	9,3	11,8	9,8	10,4	11	10,5	1	9,2
V15	8	11,8	11,3	13,3	9,3	10,7	2,1	19,4
SL	16,4	12,9	13,4	13,4	12,7	13,8	1,5	11
PF	13	16	11,7	13,7	17,2	14,3	2,3	15,8

Anexo I. Ensayo de tasa de absorción inicial (succión).

Registro fotográfico de la prueba T.I.A. se puede detallar en la figura I y ver los resultados en la tabla I1 así como observar el tiempo de pre-humedecimiento para su uso en la tabla I2.

Figura I. Prueba de tasa inicial de adsorción de agua en probeta tipo B.



Se calculó de la muestra de “Arcilla” el ensayo 1 utilizando el peso antes y después, así como las dimensiones de la cara utilizada en la prueba aplicando la ecuación (5).

$$G = 59,6g - 55,07g = 4,53g$$

$$A = 9,6 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm} = 24 \text{ cm}^2$$

$$\text{Tasa inicial de Absorción, } T.I.A. = \frac{4,53 \text{ g}}{24 \text{ cm}^2} = 0,188 \sim 0,19$$

Tabla I1. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción (T.I.A.).

Ensayo Muestra	1	2	3	4	Promedi	Desviación Estándar	Desviación Estándar (%)
	[G/cm ² /min]	[G/cm ² /min]	[G/cm ² /min]	[G/cm ² /min]	o [G/cm ² /min]		
Arcilla	0,19	0,24	0,17	0,15	0,19	0,04	19,14
Patrón	0,27	0,27	0,24	0,25	0,26	0,01	5,21
V1	0,23	0,23	0,2	0,35	0,25	0,06	25,63
V5	0,26	0,27	0,2	0,27	0,25	0,03	12,39
V10	0,27	0,16	0,23	0,16	0,21	0,06	26,84
V15	0,25	0,25	0,2	0,24	0,23	0,02	9,84
SL	0,24	0,21	0,26	0,2	0,22	0,03	12,18
PF	0,29	0,27	0,19	0,27	0,25	0,04	17,74

Tabla I2. Pre-humedecimiento al momento de emplear.

Tasa inicial de absorción G/cm ² /min.	Tiempo recomendado de pre-humedecimiento
< 0.10	5 min
< 0.15	1 h
< 0.25	24 h

Anexo J. Cálculo de la densidad de las probetas cerámicas.

En la tabla J se presentan los resultados obtenidos de cada una de las muestras de probetas cerámicas.

Haciendo uso del cálculo 1 de la muestra de “Arcilla” en la cual se usó todas las dimensiones de la probeta, así como su masa utilizando la ecuación (6).

Masa= 62,01g

alto promedio = $(13,34+13,28+13,29+13,33) / 4 = 13,31\text{mm} / 10 = 1,33\text{ cm}$

ancho promedio = $(26,88+26,66+26,71+26,83) / 4 = 26,77\text{mm} / 10 = 2,67\text{ cm}$

largo promedio = $(99,94+99,75+99,87+99,81) / 4 = 99,84\text{mm} / 10 = 9,98\text{ cm}$

$$D = \frac{62,01}{(1,33) \times (2,67) \times (9,98)} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 1,74 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

Tabla J. Resultados del cálculo de densidad.

Nombre						Promedio	Desviación estándar	% Desviación estándar
	1 (g/cm ³)	2 (g/cm ³)	3 (g/cm ³)	4 (g/cm ³)	5 (g/cm ³)	io (g/cm ³)		
Arcilla	1,74	1,74	1,78	1,77	1,82	1,77	0,03	1,81
Patrón	1,74	1,75	1,83	1,74	1,73	1,76	0,04	2,42
V1	1,78	1,76	1,69	1,73	1,75	1,74	0,03	1,89
V5	1,70	1,73	1,72	1,68	1,80	1,73	0,05	2,67
V10	1,69	1,81	1,74	1,69	1,55	1,70	0,10	5,72
V15	1,56	1,60	1,70	1,61	1,71	1,63	0,07	4,11
SL	1,15	1,81	1,78	1,69	1,73	1,63	0,27	16,73
PF	1,81	1,75	1,78	1,69	1,69	1,74	0,05	2,86

Anexo K. Cálculo del porcentaje de contracción lineal de las probetas cerámicas.

En la tabla K se puede apreciar los resultados de la contracción lineal que se presentaron las diferentes muestras de probetas cerámicas.

Usando el cálculo 1 de la muestra de “Arcilla” se utilizan las medidas del largo de las probetas para aplicar la ecuación (7).

Largo esperado = 100 mm

Largo obtenido= (99,94+99,75+99,87+99,81) / 4= 99,84mm

$$\begin{aligned} \%Contracción &= 100x \frac{Largo\ esperado - Largo\ obtenido}{Largo\ esperado} = 100x \frac{100 - 99,84}{100} \\ &= 0,16\% \end{aligned}$$

Tabla K. Resultados de porcentaje de contracción lineal.

Ensayo	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	Promedio	Desviación estándar	Porcentaje desviación estándar (%)
Arcilla	0,16	3,15	2,73	2,19	2,08	2,06	1,15	55,62
Patrón	2,32	1,41	2,55	2,08	1,84	2,04	0,44	21,55
V1	2,04	1,88	0,77	0,60	2,67	1,59	0,88	55,45
V5	1,25	1,36	1,22	1,66	1,97	1,49	0,32	21,23
V10	0,22	2,66	1,84	1,14	1,10	1,39	0,91	65,48
V15	0,42	0,93	1,71	0,36	2,02	1,09	0,75	68,96
SL	1,97	2,66	3,05	2,23	0,45	2,07	0,99	47,94
PF	1,98	1,14	2,26	0,98	1,44	1,56	0,55	35,10

Anexo L. Análisis químico de los exudados.

En la tabla L se observa el análisis químico de los exudados obtenido mediante el método de fluorescencia de rayos X.

Tabla L. Análisis químico de los exudados por fluorescencia de rayos X.

Composición					
Nombre	Analito(óxido)	Resultado (%)	Analito	Resultado (%)	Des. Estándar
Silicio	SiO₂	80,67	Si	37,69	0,125
Calcio	CaO	6,99	Ca	4,99	0,023
Aluminio	Al₂O₃	5,20	Al	2,75	0,053
Potasio	K₂O	2,28	K	1,90	0,015
Magnesio	MgO	1,60	Mg	0,96	0,053
Hierro	Fe₂O₃	1,49	Fe	1,04	0,009
Plomo	PbO	0,73	Pb	0,67	0,004
Azufre	SO₃	0,35	S	0,14	0,010
Bario	BaO	0,29	Ba	0,26	0,020
Cobre	CuO	0,19	Cu	0,08	0,002
Estroncio	SrO	0,07	Sr	0,06	0,001
Manganeso	MnO	0,06	Mn	0,05	0,003
Titanio	TiO₂	0,05	Ti	0,03	0,011
Zinc	ZnO	0,04	Zn	0,03	0,001
Rubidio	Rb₂O	0,01	Rb	0,01	0,001

Anexo M. Calculo patrón del cálculo teórico del contenido de mercurio en las probetas.

Con los datos obtenidos de otros autores [9,26] y teniendo en cuenta la carga utilizada en la mezcla de las probetas cerámicas “V1” se aplica la ecuación (8).

$$f_{Hg} = 0,01$$

$$f_{v \text{añadido}} = 1$$

$$f_{polvo} = 1,58$$

$$m_{Total} = 1000g$$

$$\text{Contenido Hg en la probeta [ppm]} = \frac{0,01 \times 1 \times 1,58}{1000} = 0,0158 \text{ ppm}$$