

APROVECHAMIENTO DE ESCORIAS METÁLICAS EN LADRILLOS CERÁMICOS: UNA REVISIÓN

USE OF METALLIC SLAGS IN CERAMIC BRICKS: A REVIEW

Yessenia Herrera Vásquez ¹

Franco Stefano Carrasco Collantes ²

Sócrates Pedro Muñoz Perez ³

Fecha de recepción : 20/01/2021

Fecha de aprobación : 05/02/2021



Resumen

Este documento presenta una revisión de la literatura sobre el aprovechamiento de diversas escorias metálicas en la fabricación de ladrillos cerámicos, con el objetivo de describir y analizar el comportamiento de estas unidades de ladrillo modificados, que consiste en sustituir un porcentaje del total de arcilla para una unidad de ladrillo, buscando mejorar sus propiedades mecánicas, en investigaciones realizadas, han dado muestra de óptimos resultados, al utilizar escorias de plomo, acero, bronce, ferrocromo, lodos, entre otros, pudiéndose reciclar y darlo el uso ya antes mencionado, así poder disminuir los impactos ambientales, provocadas por la contaminación que dichos residuos generan y agregar un plus en el rubro de la construcción. Se revisaron 35 artículos indexados entre los años 2012 al 2020 los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 5 artículos son de Scopus, 3 de ResearchGate, 11 de ScienceDirect y 6 de Scielo, 8 de ProQuest, 2 de Latindex 2.0, sobre escorias metálicas, caracterización de arcillas y ladrillo cerámico.

Palabras clave: Escorias, metales, ladrillos cerámicos.

Abstract

This document presents a review of the literature on the use of various metal slags in the manufacture of ceramic bricks, with the aim of describing and analyzing the behavior of these modified brick units, which consists of substituting a percentage of the total clay for a brick unit, seeking to improve its mechanical properties, in investigations carried out, they have shown optimal results, when using lead slag, steel, bronze, ferrochrome, sludge, among others, being able to recycle and give it the use already mentioned above, thus being able to reduce the environmental impacts caused by the pollution generated by said waste and add a plus in the construction sector. 35 articles indexed between the years 2012 to 2020 were reviewed and are distributed as follows: 5 articles are from Scopus, 3 from ResearchGate, 11 from ScienceDirect and 6 from Scielo, 8 from ProQuest, 2 from Latindex 2.0, on metal slags, characterization of clay and ceramic brick.

Key words: Slags, metals, ceramic bricks.

1 Estudiante, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, hvasquezjess@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-4360-8414>

2 Estudiante, Escuela de Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, ccollantesf@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-7176-2131>

3 Maestro en ciencias de la Tierra con mención en Geotécnia, Universidad Señor de Sipán, Perú, msocrates@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

1. Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los problemas principales que se ha generado en estos últimos siglos, se ha referido a sustancias peligrosas, perjudiciales para la salud, causando daños a los ecosistemas presentes en el mundo, estos contaminantes pueden ser por emisión de origen natural (biogénicos), o por la intervención de la misma humanidad (antropogénicos) (Ubilla y Yohannessen, 2017).

Durante el proceso de desarrollo de la humanidad, han adquirido nuevas tecnologías, para su propio beneficio, tal es el caso de las baterías de plomo-ácido que han sido utilizadas por más de 130 años, utilizados en vehículos, navegación, aviación, entre otros; Se dice que cada unidad requiere entre 12 a 14 kg de plomo, en una vida útil de 2 a 5 años, generando grandes cantidades de desecho cada año, aproximadamente 3 millones de desecho (Li et al., 2020) (Zhang, Chen, Zhang, y Liu, 2016). Estas se obtienen a partir de las baterías vencidas, que resulta de la conversión de sulfato y óxido de plomo, cabe resaltar, que las escorias están compuestas por óxido, sílice, aluminio, etc. (Andrade, Costa, y Andrade, 2014) (Lizarazo, Salas, y Escobar, 2016).

Grandes empresas industrializadas evocadas a la fabricación y refinación de acero, originan grandes cantidades de desechos anuales, sin que esta llegue a ser eliminada correctamente (Karayannis et al., 2016), el acero es uno de los metales más usados en la industria, es el mayor consumidor en refractarios, es más, absorbe el 70% del total de la producción de los materiales, la cual origina significativamente escorias, polvo, lodos y refractarios, dado que produce de 2 a 4 T de residuo, por cada tonelada de acero que se fabrica (Lundkvist, Larsson, y Samuelsson, 2013).

Al igual que el acero, la producción del cobre origina escoria, de 2.2 a 3 toneladas por cada tonelada de cobre que se produce, cuyos componentes la constituyen el silicio, aluminio, óxido de hierro y calcio (Deng et al., 2019). Empresas como Antenas de Villa Clara, encargadas en corte de aluminio, ellos logran procesar en un promedio de 2 mil toneladas de aluminio anualmente, de las cuales generan entre 20 y 30 ton de residuo, esto representa una pérdida de 20 a 30 dólares por tonelada (Gomez, Perdomo, Cruz, y Quintana, 2019).

Aquellos procesos metalúrgicos, basados en la elaboración de ferrocromo, tiene una alta demanda en la actualidad, por ende, origina grandes masas de residuos, que son altamente ofensivos para el medio ambiente, y como alternativa se busca reemplazar un porcentaje de arcilla que contiene el ladrillo cerámico, para la mejora de sus propiedades y a la vez hacer de este metal inofensivo para el medio ambiente (Korkut, Gencel, y Brostow, 2013).

Asimismo, va a depender del tipo de metal que se produce, de hecho, generan grandes volúmenes de residuos y/o escorias, estas tienden a tener ciertas propiedades mineralógicas, que, dependiendo a sus características físicas y químicas, podrán ser utilizadas en el campo de la construcción, como remplazo de material, agregado o aditivo. (Li, Li, y Yuan, 2012).

2. Metodología

El presente documento se elaboró usando las bases de datos Scopus, ResearchGate, ScienceDirect, Scielo, ProQuest y Latindex 2.0. Se encontraron 35 artículos indexados y distribuidos de la siguiente manera, 5 artículos en Scopus, 3 en ResearchGate, 11 en ScienceDirect, 6 en Scielo, 8 en ProQuest y 2 Latindex 2.0, donde se encontraron 12 artículos del 2012 al 2015 y 23 del 2016 al 2020. Para la búsqueda de los artículos se usaron las siguientes palabras claves: escorias metálicas, caracterización de arcillas, ladrillo cerámico, lixiviación de metales, metals in clay brick, reciclagem de metal y caracterização de tijolos

cerámicos. Para un mejor detalle en la tabla 1 se muestra los artículos usados como literatura según base de datos y años de publicación.

Tabla 1.

Artículos usados como literatura, según base de datos y año de publicación.

Base de datos	Año de Publicación	
	2008 - 2015	2016 - 2020
Scopus	2	3
ResearchGate	1	2
Science Direct	5	6
Scielo	1	5
ProQuest	3	5
Latindex	0	2
Total	12	23

Fuente: Elaboración propia

3. Importancia del reciclaje de metales

Los materiales retornados o reciclados permiten el remplazo de materia nueva por materia reciclable, reduciendo los costos de producción, es a partir de esto que se da el valor de recuperación (VR), definida como la “actividad administrada organizada” para recuperar el máximo “valor económico” de los posibles productos de su ciclo de vida final, para reutilización en la producción de nuevos productos (Arroyo, Villanueva, Gaytán, y García, 2014)

La extracción de minerales se somete una serie de procesos, en las que consisten en molienda, transporte, fundición, refinación (ya sea primaria y/o secundaria), por ende, origina una variedad de emisiones a causa de los metales que se explotan, perjudicando la atmósfera, los suelos, las aguas a nivel superficial y subterráneo. Ciertos lugares urbanos, tienen niveles elevados de concentración de metales, debido al tiempo de acumulación de contaminación y a que no existe o hay un déficit de control de estas emisiones, por la cual está agravando la flora y fauna de la Tierra, inclusive al propio humano. Se ha podido divisar en estas últimas décadas, que ha habido problemas con las aguas subterráneas, pues se han encontrado elevadas concentraciones de metales, afectando a pobladores que residen alrededor de las zonas mineras y metalúrgicas, gran parte de los pueblos afectados, se ubican cerca de los más importantes depósitos de minerales, plantas metalúrgicas de fundición y refinación, plantas de fundición secundaria aplicadas al reciclaje de diversos metales (Soto y Olvera, 2019).

Así mismo, en Brasil, uno de los principales países productores de plomo (Pb), aproximadamente 600,000 personas trabajan como recolectores de material de reciclaje, el trabajo que realizan los recolectores de material reciclado comprende las etapas de recolección y separación de materiales, para su posterior entrega a las industrias de reciclaje (Maleronka, Kúno, Espindola, Viana, y Gouveia, 2020).

Se realizó un estudio para evaluar la exposición de los recolectores con estos metales pesados en Sao Paulo, el tamaño de muestra se calculó en base a resultados de niveles de plomo en el torrente sanguíneo de los individuos expuestos ocupacionalmente en esta metrópoli, obteniendo el 6% de nivel medio de plomo en la sangre, con un 95% de nivel de confianza del tamaño de muestra de 271 individuos, dando a conocer el nivel de intoxicación que conlleva el reciclaje de plomo en esta región (Maleronka et al., 2020).

En Estados Unidos se reciclan anualmente 56 millones de toneladas de chatarra de hierro y acero, 10 millones de chatarra provenientes de vehículos, 1,3 toneladas de cobre, 2,5 millones t de aluminio, 1,3 millones t de plomo, 300 mil t de zinc y 800 mil t de acero inoxidable, que de la mano de carecer de poca referencia al prevenir el riesgo en la labor, se concluye con el mal controlamiento y exposición de metales pesados como lo son el plomo, el níquel y cadmio, generando graves cuadros en la piel, en el sistema respiratorio, traumas musculares, entre otros, sumándole a todo esto, los accidentes laborales, que superan en 5 a 1 al sector industrial, siendo causales de muertes como consecuencia del reciclaje de metales pesados (Gómez y Cremades, 2013).

El reciclaje de diversos metales es un avance para obtener un impacto ambiental favorable en el futuro, el esfuerzo de diversos investigadores por redescubrir un nuevo uso de las distintas escorias que son origen de los procedimientos pirometalúrgicos, se ha visto que escorias generadas de la siderurgia que han sido reutilizadas en los procesos de fabricación de cemento, cerámica, y/o otros. También se ha incluido escorias del cobre de la pirometalurgia la cual son aplicados para estos usos mencionados anteriormente (Bazan, Brandaleze, Valentini, y Hidalgo, 2015).

3.1. Práctica general de reciclaje de metales

Los materiales a reciclar, hablese en este caso de los metales, pasa por un proceso para obtener un material seleccionado y para su final reutilización, primero es el tratamiento inicial, concierne en actividades como pesaje de las muestras, y la obtención de la composición de las mismas, luego pasa por la separación y caracterización inicial, consiste en separar el metal de otros elementos que se encuentra en la muestra, y luego pasar por la difracción de rayos X, el tercer procedimiento es la trituración secundaria y clasificación, con la finalidad de obtener un material más homogéneo y prepararla para la molienda, siendo el siguiente procedimiento, etapa final donde se obtiene a partir de esta un material fino para su consiguiente análisis granulométrico y composición física (Sánchez, Betancur, y Ocampo, 2016).

4. Aplicación de las escorias metálicas en el ladrillo cerámico

Es necesario determinar los porcentajes de arenas, limos y arcillas, para la producción de ladrillos cerámicos, mediante los Métodos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería y/o arcilla, uno de ellos es realizar mediante el método de cuarteos, por consiguientes estas sean sometidos a los ensayos de clasificación granulométrica, índice de plasticidad por el método de Límites de Atterberg, clasificación de porcentajes de arcillas por el método granulométrico mediante el hidrómetro (Afanador, Guerrero, y Monroy, 2012).

Por lo tanto, inquirir en el índice de plasticidad de la materia que se tiene disponible, asimismo determinar el tipo de arcilla, la coloración que aporta a la cerámica en las distintas fases en las que se somete, asimismo determinar la alcalinidad de diferentes elementos que contiene la arcilla, además determinar la presencia de carbonato de calcio y minerales, son componentes que se deberían tener en cuenta para la planificación en el proceso cerámico (Alvarez, Sanchez, Corpas, y Gelves, 2018)

4.1. Característica de la arcilla

Para poder determinar las características del material cerámico, como el porcentaje de óxidos, para ello se puede utilizar un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX), en caso que se requiera determinar los caracteres mineralógicos del material cerámico, se realiza mediante difracción de rayos X (DRX) (Cámara et al., 2012). Entre su composición de la arcilla los óxidos más predominantes son SiO₂ y Al₂O₃, además de Fe O, CaO, MgO y K O (Moreno,

Pabón, Cely, y Cely, 2019) (Veli et al., 2014) , se pueden encontrar caolinita entre los porcentajes de 17.6% y 27.2%, asimismo los óxidos de silicio entre 56.39% y 62.4%, y otros compuestos como la micriclina y, minerales diversos (Cámara et al., 2012) (Quaranta, Pelozo y Díaz, 2015).

4.2. Lixiviación en metales

Para la recuperación de diversos metales, pasa por un proceso llamado lixiviación que es producto de la reacción líquido-sólido, una de las formas tradicionales es el uso de cianuro, generando una gran contaminación medioambiental, sin embargo, existe la “Ingeniería verde” utilizada en los procesos de lixiviación, concentración, disgregación de las fases y la obtención del metal, cabe resaltar que en todos estos procedimientos deben tratar de ser amigables con el medio ambiente (Romero, Guerrero, y Mora, 2020). La tiurea es una opción eco amigable, debido a que tiene baja toxicidad (Masoud, Amir, y Bahram, 2016)

Mediante la lixiviación se puede determinar el rango de pH de la región del área permanente de agua, la temperatura de trabajo, porcentaje de sólidos de la masa y densidad de reactivo de lixiviación (Rojas, Echeverry, y Sierra, 2018).

4.3. Caracterización de las escorias metálicas

En la caracterización de escorias metálicas, se obtiene a partir de procesos para determinar su composición química, estos procedimientos se refieren a análisis químicos, como el “ensayo de fuego”, que se utiliza para determinar sustancias en la muestra como metales preciosos, y pasar por procedimientos de espectrometría para visualizar sus características (Bazan, Brandaleze, Valentini, y Hidalgo, 2015).

4.3.1. Escoria de plomo

Se observó a partir de las muestras obtenidas de este elemento a través del Test de lixiviación, compuestos como el óxido férrico, siendo un componente potencial que atribuye coloración, el óxido de sodio, este compuesto presentado en forma de carbonato y sulfato, cuyas singularidades puede producir un resultado sintetizador en el proceso de cocción de las unidades de arcilla, y azufre. Estos compuestos aproximadamente alcanzaron el 85% en peso, además de presentar proporciones considerables de plomo y óxido de silicio, que sumado a lo anterior alcanza a un 96% en peso (Santacruz y Torres, 2019).

4.3.2. Escoria de acero

La escoria de acero es producto de la fabricación de acero, mediante el refinado de este, la composición química va a depender de factores como la temperatura y el tiempo de fusión, por lo tanto, la escoria se presenta como líquido fundido con compuestos complejos como los silicatos y óxidos, solidificados al enfriar (Sibucks et al., 2019).

Se analizó diversas escorias de acero, hablese de convertidor de escoria de acero, polvo blanco, lodos de alto horno, y mezcla refractaria post-mortem. Estas escorias en mención pasaron por un proceso de tamizaje, de las cuales la muestra de lodos de alto horno, se pudo obtener el mayor contenido de fracción fina en un 62%, y de las muestras de convertidor de escoria de acero, se obtuvo mayor contenido de fracción gruesa con un 65%. En cuanto al polvo blanco, existe la presencia de calcita, dolomita e hidróxido de calcio, como fases cristalinas, asimismo, en los lodos de alto horno se presencian la hematita y cuarzo, siendo estas las fases principales de este tipo de muestra y además de hierro en pocas cantidades (Quaranta, Pelozo, y Díaz, 2015).

4.3.3. Escoria de cobre

Las muestras de cobre fueron obtenidas de Boliden Oy, Finlandia, cuyo proceso de lixiviación, dio como resultado que la escoria de cobre, cuyo diámetro promedio de las partículas es de 15 μm , se obtuvo un porcentaje en peso de óxido de hierro (FeO) en un 54.7%, y un porcentaje de óxido de silicio (SiO₂) de 32.8%, además se evaluó Componentes de QFS,

que pasado por el proceso de molienda se obtuvo un tamaño de partícula de 9 μm , donde el SiO_2 se presenta con el 77.5% y en cuanto al caolín el 53.2% del mismo componente (Lemougna et al., 2020).

En este caso las escorias de cobre, clasificadas como escorias ácidas, hubo una mayor presencia de SiO_2 entre el 38 y 49 %, además de Fe_2O_3 entre el 18 y 37 % y una significativa porción de CaO de 8 a 26 % y Al_2O_3 en un 8.5%. La escoria de cobre presenta fases cristalinas como diópsido, fayalita, magnetita, cristobalita y clinoferrosilita (Nazer et al., 2016).

4.3.4. Escoria de ferrocromo

La composición química de la escoria de ferrocromo está compuesta principalmente por SiO , Al O y MgO (Veli et al., 2014). Las muestras obtenidas de ferrocromo pasaron por el proceso de secado triturado y tamizado, determinando finalmente su composición con un Espectrofotómetro de análisis elemental de fluorescencia, determinándose grandes cantidades de óxido de magnesio (MgO) con un 35.8% en peso, óxido de silicio (SiO_2) del 29.38% en peso, y Al_2O_3 con el 23.47% en peso, además de encontrarse óxido de cromo y hierro, pero en pocas cantidades. Las fases principales de la escoria de ferrocromo es el vidrio amorfo y la forasterita, asimismo la estructura de esta escoria incorpora de manera parcial fases vítreas cristalinas y amorfas (Gencel et al., 2013).

4.4. Metodologías empleadas en el uso de escorias metálicas

4.4.1. Escoria de plomo

Fue necesaria ejecutar una distribución del suelo para introducir los porcentajes de arenas, limos y arcillas utilizado en la materia prima para fabricar los ladrillos cerámicos, La toma del patrón se hizo mediante un muestreo metódico por el procedimiento de cuarteos sucesivos hasta lograr 4 kg, para obrar los ensayos de caracterización física de la muestra desde el punto de vista de: clasificación granulométrica, medidas de plasticidad por el procedimiento de límites de Atterberg y clasificación del porcentaje de arcillas y limos por el procedimiento de análisis granulométrico por medio de hidrómetro (Quaranta, Pelozo, y Díaz, 2015). La recolección y determinación de arcillas. Se seleccionaron arcillas en el municipio de San Juan Del Cesar en La Guajira – Colombia (Fuentes, Isenia, y Ascencio, 2019).

Se utilizó una escoria de plomo adquirida gracias a una empresa industrial colombiana. Este elemento se encuentra sometido a trituración en pequeños molinos de mandíbulas y en trituración secundaria en molinos de martillos, con el objetivo de obtener partículas mucho más diminutas antes de su próxima utilización en el relleno. En la parte experimental se seleccionaron muestras. Cada muestra fue seleccionada al azar de una muestra mixta cuarteada y homogeneizada. Luego la escoria fue tamizada a través del tamiz malla N° 06 (3,55 mm) y se expuso al aire libre durante quince días para obtener la maduración de sus componentes (Santacruz y Torres, 2019).

La elaboración de ladrillos de prueba con dos tipos de porcentaje de reemplazo del material arcilloso con el material obtenido (0% y 15%), elaborando para cada porcentaje piezas a diferentes temperaturas de cocción (900,950,1000 y 1050°C) temperaturas semejantes a las utilizadas en las producciones industriales de ladrillos. Realizándose cuatro repeticiones obteniendo un total de 32 elementos experimentales (Santacruz y Torres, 2019).

La elaboración experimental se llevó a cabo en una planta construida a escala, realizando las etapas de elaboración de una producción ladrillera convencional, llevando a cabo todos los pasos realizados para un buen proceso de producción de ladrillo (homogeneización, humectación, amasado, extrusión, moldeo, secado y cocido). Llevándose el proceso de secado

en dos tiempos, el primero a temperatura ambiente durante un día procediendo a un secado mecánico a temperatura ambiente iniciando en 10°C/h hasta los 110°C/h. La posterior cocción de los elementos se llevó a cabo en laboratorio, realizado con incrementos de temperatura desde los 5°C/min hasta los 1000°C en 150 minutos, para luego reducir la temperatura a 100° durante 4 horas (Santacruz y Torres, 2019).

4.4.2. Escoria de acero

La escoria de acero se apila al aire libre durante tres meses para exponer el material a la humedad natural de las precipitaciones, el propósito del envejecimiento es permitir una potencial hidratación y una expansión natural (Chen y Wei, 2016).

La escoria de acero, polvos blancos, lodos de alto horno y la mezcla refractaria como post-mortem, se utilizaron como remplazo de un porcentaje total de la unidad de ladrillo de arcilla, técnicas fisicoquímica y análisis microestructural permitieron determinar sus características, asimismo poder determinar el índice plástico de cada mezcla en los ladrillos por extrusión mediante el aparato denominado “casa grande”. Estos porcentajes de remplazo varió entre el 15% y el 50% en cada una de las muestras (Quaranta, Pelozo, y Díaz, 2015).

4.4.3. Escoria de bronce

En este estudio realizaron investigaciones, en base a la escoria de cobre, relaves de espodumena (Qfs) y caolín, a partir de ello, se realizaron muestras prismáticas rectangulares (20 x 20 x 80 mm). Estas muestras fundidas, secaron alrededor de 1 día, cerca de los 20 °C, después de desmoldarse pasaron por secado otro día a 100 °C, se usó el caolín en algunas muestras con la finalidad de obtener una mayor resistencia, para mejorar el manejo en el horno. Fueron 6 prototipos, la primera llevaba 100 gr de escoria de cobre, la segunda 90 gr de escoria de cobre, la tercera, 68 gr de escoria de cobre, 22 gr de Qfs y 10 gr caolín, la cuarta muestra contenía 45 gr de escoria de cobre , 45 gr de Qfs y 10 gr de caolín, la quinta muestra, con 50 gr de escoria de cobre y 50 gr de Qfs, y la última muestra contenía 22 gr de escoria de cobre, 68 gr de Qfs y 10 gr de caolín, cabe resaltar que, las tres últimas muestras fueron sometidas a temperaturas de 950 a 1000 °C, 1050 a 1100 °C y 1150 °C respectivamente (Lemougna et al., 2020).

4.4.4. Escoria de ferrocromo

En este estudio, se logró la producción de ladrillos a partir de mezclas de arcilla para ladrillos y aditivos que contienen escoria de ferrocromo y zeolita natural. La escoria de ferrocromo es un material de desecho que se obtiene de la fabricación de ferrocromo metálico en la fábrica de Eti Krom, Elaz y o g, Turquía. La escoria de ferrocromo permanece como residuo, entre otros, en la producción de ferrocromo metálico. La escoria se preparó como agregado triturándola y moliéndola en un molino de laboratorio hasta un tamaño de partícula menor de 100 micrones para la producción de ladrillos. La materia prima de arcilla se obtuvo de un fabricante de ladrillos (Üç Y yo ld yo z Tugla) en Bartın, Turquía. Otra materia prima es la zeolita natural (tipo clinoptilolita) obtenida de Rota Madencilik, Gördes, Turquía (Veli et al., 2014).

Las materias primas fueron inicialmente sometidas a pretratamientos como secado, molienda y tamizado. La composición química de las materias primas se determinó mediante rayos X espectrómetro de análisis elemental de fluorescencia (XRF). El análisis de fase cristalina o contenido mineral de las materias primas se realizó mediante difracción de rayos X en polvo (XRD). Sus comportamientos térmicos se realizaron mediante análisis termo gravimétrico (TGA) (Gencel et al., 2013).

4.4.5. Escoria de ferrocromo bajo contenido de carbono

El estudio se inició con la recepción de muestras con contenido de aproximadamente 500 kg de escoria, el material fue homogeneizado y cuarteado para obtener una muestra principal de aproximadamente 150 kg, para la preparación de la muestra, la escoria se sometió a etapas de trituración en mandíbulas y rodillos para así poder obtener una clasificación granulométrica de

un tamaño de partícula inferior a 6,37 mm, el material fue homogeneizado y cuarteado luego fue sometido a análisis de distribución de tamaño de partícula por el método de fluorescencia de rayos X (FRX) (Texeira et al. , 2015).

4.4.6. Otros residuos empleados en la fabricación de ladrillo cerámico

Evaluaron el comportamiento de prototipos de ladrillos a base de cerámica adicionado CSR y cenizas volantes resultado de las centrales térmicas, creando 4 muestras diferentes, el primer prototipo lo componen arcilla y carbón, el segundo prototipo, contiene arcilla y combustibles sólidos recuperados, el tercero, sustituye el 7% en peso del total de arcilla que contiene una unidad de ladrillo, y el último contiene el 7% de CSR y el 20% de cenizas volantes en peso, y 73% de arcilla. Se rigieron por metodologías empleadas para el cálculo de Balance Energético, para el análisis del ciclo de vida, y metodología para calcular externalidades ambientales para las muestras planteadas (Restrepo y Cadavid, 2019).

Para el procedimiento en la elaboración de ladrillos de arcillas, participa la energía térmica y eléctrica, esta investigación sopesa el equilibrio de la energía térmica y la estimación del procedimiento cerámico no tendrá cambios en su masa de manera significativa, en vista de que la arcilla como materia principal, prima y necesaria para la fabricación de ladrillos cerámicos, contiene un porcentaje mínimo de materia orgánica y el calor de descomposición, este último está relacionado a las sales de descomposición al agua de constitución, dando origen al calor de reacción, este calor considera el calor de calentamiento, en el equilibrio de la energía consumida, aquel calor que se pierde por medio de las paredes y el calor perceptivo del humo, tal como se indica en la ecuación (1) (Restrepo y Cadavid, 2019).

$$(1) \quad \text{Energía consumida} = \text{calor calentamiento} + \text{calor reacción} + \text{calor perceptivo} + \text{pérdidas}$$

5. Discusión de la literatura revisada

Las muestras de ladrillo realizados uno sin escoria de plomo, y el otro remplazando el 15% del total de la arcilla que lo contiene, al ser sometidas a cocción, ambas presentaron un porcentaje de contracción, por la cual el ladrillo con escoria de plomo presentó una mayor contracción al secado entre el 7 y 8 %, en cuanto al modelo de ladrillo sin adición de escoria mostró una adición menor al secado entre el 3 y 4 %, al llegar ambas a una temperatura de 1050 °C. Por otro lado, el coeficiente de absorción disminuyó considerablemente en el ladrillo con escoria, a diferencia del modelo normal, obteniéndose un 5% de absorción solamente, no obstante, el ladrillo con adición de escoria solo logró alcanzar su mayor resistencia (aprox. 65 Kg/cm²) al llegar a los 1000 °C de temperatura de cocción, en cambio la muestra normal tuvo aumento sucesivo hasta llegar los 1050 °C de temperatura, sin embargo; solo alcanza un poco más de 45 Kg/cm².

Las escorias de acero, lodos de alto horno, convertidor de escoria de acero, polvo blanco y mezcla refractario post mortem, fueron evaluados su comportamiento plástico en muestras, adicionando el 10 y el 50 %, según los resultados obtenido, los residuos de los de alto horno tuvo mayor índice de plasticidad con la adición del 10% de escoria, en cambio, el convertidor de escoria de acero, mostró el menor índice de plasticidad, esto es se obtuvo que, en todas la muestra a aumentar cada tipos de escoria ya mencionadas iban disminuyendo su plasticidad.

De las muestras prismáticas realizadas a base de escoria de cobre, se obtuvo mayor resistencia de aquella que es la combinación de escoria de cobre y Qfs, alcanzando entre los 85 y 140 MPa, a 1050 – 1100 °C de temperatura. Para las muestras que solo lleva escoria de cobre, presentaron menor resistencia a la compresión, comparado con los demás resultados se concluyó que, se debe a la falta de adición de Qfs, y además que la presencia de caolín en las muestras no benefició a la resistencia de las mismas. También se determinó el coeficiente de absorción y la densidad aparente en relación con la temperatura, cuyos resultados se dieron a

parir de la tercera, cuarta y quinta muestras prismáticas, en todas estas la absorción de agua disminuyó cuando la temperatura iba en aumento, y la densidad aparente aumento cuando la temperatura se encontraba entre 1050 y 1100 °C, sin embargo, disminuyó considerablemente cuando la temperatura alcanzo los 1150 °C.

Se detectó una disminución de la masa de arcilla al aumentar la temperatura, el primer indicio fue el 1% cuando estaba a 100 °C, y así fue que llegó a perder el 7% al llegar a los 1100 °C, aquel ladrillo con adición de ferrocromo tiene una densidad ligeramente mayor al ladrillo normal, a medida que se inserta mayor cantidad de escoria de ferrocromo, la intensidad del rojo del ladrillo aumenta (30% de escoria de ferrocromo), en cuanto a la porosidad del ladrillo, el ferrocromo tuvo la capacidad de disminuir la porosidad en las muestras, obteniéndose como mejor resultado del 32.1% de porosidad, muestra por la cual contenía el 70% en peso de arcilla y el 30% en peso de escoria de ferrocromo, así mismo se obtuvo el 16,1% de absorción de agua. Sin embargo, cuando las muestras fueron sometidas a la resistencia por flexión, fue el ladrillo normal, sin aditivo, que tuvo mejor comportamiento, al obtener el 100% de resistencia, el siguiente obtuvo el 95.7% compuesto por el 90 % y el 10% en peso de arcilla y escoria de ferrocromo respectivamente, lo mismo sucedió al someter las muestras a la resistencia por compresión, el ladrillo normal, se llevó el crédito por obtener el 100% de resistencia, y el siguiente el 91.7% de resistencia, la misma muestra ya en mención.

6. Conclusiones

Todas estas escorias tratadas en este artículo tienen como componente en común y de mayor proporción el óxido de silicio (SiO_2), y otros componentes químicos como óxido ferroso, óxido de magnesio, entre otros. Igualmente, la arcilla está compuesta por estos componentes, lo que le hace compatible con las diferentes escorias de metales, al entrar en contacto en una mezcla.

En las muestras de cada investigación, dieron buenos resultados al incorporar las diferentes escorias, sustituyendo parte del total de la arcilla contenida en un ladrillo o prototipo. Sin embargo, fueron desfavorables los resultados cuando la dosis o el porcentaje que se incorporaba, se incrementaba. Ya que en la mayoría menguaba la resistencia, el coeficiente de absorción y/o porosidad de las muestras.

No todas las investigaciones pasaron por los mismos ensayos para obtener resultados y así poder compararlos entre sí, algunos procuraron en obtener el índice de plasticidad en el caso de las muestras de la escoria de acero, sin embargo, en todas coinciden que al utilizar las escorias metálicas cualquiera que sea, reemplazando un porcentaje moderado en peso del total de la arcilla, disminuía su capacidad de absorción, por ende, su contenido de porosidad.

Todas las muestras de ladrillos cerámicos, lograron alcanzar su resistencia máxima entre los 1000 y 1100 °C de temperatura, al someter estas muestras por el procedimiento de cocción, sin embargo, cuando la temperatura sobrepasaba al rango de los 1000 – 1100 °C de temperatura, pasaba lo contrario, la resistencia disminuía considerablemente.

Finalmente, con estos procedimientos de reutilización y aprovechamiento de diversas escorias metálicas en los ladrillos cerámicos, es una alternativa viable y sostenible para el medio ambiente, ya que se lograría mermar las emisiones de contaminación en nuestros ecosistemas, y además es posible inmovilizar estas materias en unidades sólidas para que puedan utilizarse en los procesos constructivos en edificaciones y construcciones diversas.

7. Referencias

Afanador, N., Guerrero, G., & Monroy, R. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería . *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1).

- Alvarez, D., Sanchez, J., Corpas, F., & Gelves, J. (2018). Características de las materias primas usadas por las empresas del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57, 247-256. doi:10.1016/j.bsecv.2018.04.002
- Andrade, M., Costa, V., & Andrade, V. (2014). Caracterização e estudo da lixiviação de metais de escórias provenientes da reciclagem de baterias de chumbo-ácido. *Holos*, 5, 361-371. doi:10.15628/holos.2014.2042
- Arroyo, P., Villanueva, M., Gaytán, J., & García, M. (2014). Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística inversa. *Contaduría y administración*, 59(1), 9-14. doi:10.1016/S0186-1042(14)71242-2
- Bazan, V., Brandaleze, E., Valentini, M., & Hidalgo, N. (2015). Characterization of slags produced during gold melting process. *Procedia Materials Science*, 8, 851-860. doi:10.1016/j.mspro.2015.04.145
- Câmara, A., Medeiros, L., Macedo, D., & De A Melo, D. D. (2012). Propriedades físico-mecânicas e ambiental de cerâmica estrutural com estabilização de íon manganês. *Holos*, 5, 142-150.
- Chen, J.-S., & Wei, S.-H. (2016). Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. *Construction and Building Materials*, 128, 148-153. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.027
- Deng, Z., Huang, Z., Fang, H., Zhen, A., Wei, G., Meng, J., . . . Li, H. (2019). Evaluation of calcined copper slag as an oxygen carrier for chemical looping gasification of sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17823-17834. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.05.039
- Fuentes, N., Isenia, S., & Ascencio, J. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 3-25. doi:10.24050/reia.v16i32.1061
- Gencil, O., Sutcu, M., Erdogmus, E., Koc, V., Cay, V., & Sabri, M. (2013). Properties of bricks with waste ferrochromium slag and zeolite. *Journal of Cleaner Production*, 59, 111-119. doi:dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.055
- Gomez, I., Perdomo, L., Cruz, A., & Quintana, R. (2019). Alternativa de recuperación de elementos metálicos en residuos sólidos industriales. *Revista Centro Azúcar*, 35-44.
- Gómez, M., & Cremades, L. (2013). Estudio del Manejo del Plomo en Establecimientos de Tipografía, Reconstrucción de Baterías y Recicladores de Chatarra en el Departamento del Quindío, Colombia. *Ciencia & Trabajo*, 15(46), 7-11.
- Karayannis, V., Ntampeglitis, K., Lamprakopoulos, S., Kasiteropoulou, D., Papapolymerou, G., & Spiliotis, X. (2016). Elaborarea de caramizi din argila extrudata si sinterizata cu utilizare benefica de "SOL DEGRADAT" ca aditiv. *Romanian Journal of Materials*, 46(4), 523 - 529.
- Korkut, T., Gencil, O., & Brostow, W. (2013). X-ray, gamma, and neutron radiation tests on epoxy-ferrochromium slag composites by experiments and Monte Carlo simulations. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 18(3), 224-231. doi:10.1080/1023666X.2013.755658
- Lemougna, P., Yliniemi, J., Adesanya, E., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Roning, J., & Illikainen, M. (2020). Reuse of copper slag in high-strength building ceramics containing spodumene tailings as fluxing agent. *Minerals Engineering*, 155, 106-448. doi:10.1016/j.mineng.2020.106448

- Li, C., Z. Z., Wang, Y., Guo, Q., Wang, C., Zhong, P., . . . Yang, R. (2020). Lead acetate produced from lead-acid battery for efficient perovskite solar cells. *Nano energía*, 69. doi:10.1016/j.nanoen.2019.104380
- Li, Q., Li, Z., & Yuan, G. (2012). Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. *Construction and Building Materials*, 35, 687-692. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.103
- Lizarazo, J., Salas, A., & Escobar, D. (2016). Efectos del curado en las propiedades de mezclas de concreto con altos contenidos de escoria de hierro. *Informacion Tecnológica*, 27(6), 163-174. doi:10.4067/S0718-07642016000600017
- Lundkvist, K., Larsson, M., & Samuelsson, C. (2013). Optimisation of a centralised recycling system for steel plant by-products, a logistics perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 29-36. doi:10.1016/j.resconrec.2013.04.012
- Maleronka, M., Kúno, R., Espindola, A., Viana, F., & Gouveia, N. (2020). Níveis sanguíneos de cádmio, chumbo e mercúrio em trabalhadores de centros de reciclagem em São Paulo, Brasil. *Cad. Saúde Pública*, 36(8). doi:10.1590/0102-311X00072119
- Masoud, B., Amir, A., & Bahram, R. (2016). Investigate of effective factors on extraction of silver from tailings of lead flotation plant using thiourea leaching. *World Journal of Engineering and Technology*, 4, 305-312. doi:10.4236/wjet.2016.42031
- Moreno, M., Pabón, Y., Cely, L., & Cely, J. (2019). Influencia de la molienda húmeda en el comportamiento estructural y mecánico de productos cerámicos conformados por extrusión de una arcilla del Zulia (Norte de Santander, Colombia). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58, 190-198. doi:10.1016/j.bsecv.2019.01.001
- Nazer, A., Paya, J., Borrachero, M., & Monzo, J. (2016). Caracterización de la fundición de escoria de cobre chilena del siglo XIX. *Revista de Metalurgia*, 52(4), 933-938. doi:10.3989 / revmetalm.083
- Quaranta, N., Pelozo, G., & Díaz, O. (2015). Evaluation of different steel wastes and its influence in ceramic bricks shaping by extrusion. *Procedia Materials Science*, 8, 236 – 244.
- Restrepo, G., & Cadavid, C. (2019). Mejora del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario en Medellín con el uso de ladrillos cerámicos modificados*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 33-49. doi:10.22395/rium.v18n35a3
- Rojas, N., Echeverry, L., & Sierra, S. (2018). Termo-cinética de la lixiviación de plomo a partir de baterías recicladas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(11).
- Romero, H., Guerrero, R., & Mora, M. (2020). Efecto de la velocidad de agitación en la cinética de lixiviación con tiourea de minerales flotados de oro. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1).
- Sánchez, J., Betancur, J., & Ocampo, L. (2016). Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 240-251. doi:10.15446/ga.v19n2.58492
- Santacruz, J., & Torres, J. (2019). Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1), 7-18. doi:10.18359/rcin.3495
- Sibucks, A., De Oliveira, C., Molica, J., Da Costa Pereira, J., & Valmir., T. (2019). Identificar e quantificar os metais presentes da lama de aciaria e propor uma destinação. *Revista Produção Online*, 274-289.

- Soto, M., & Olvera, D. (2019). Elementos potencialmente tóxicos (Cd, Hg, Pb Y Zn) en suelos impactados por planta recicladora de plomo (Zacatecas, México), a una década de operaciones. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 35(3), 651-669. doi:10.20937/RICA.2019.35.03.11
- Texeira, A., Sampaio, J., Bertolino, L., Cardoso, E., & Borges, L. (2015). Caracterização tecnológica da escória Fe-Cr baixo carbono e recuperação da liga metálica por mesa concentradora. *Holos*, 31(5). doi:10.15628/holos.2015.1826
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño . *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118.
- Veli, V., Sutcu, M., Gencel, O., & Korkut, T. (2014). Neutron radiation tests about FeCr slag and natural zeolite loaded brick samples. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 14, 1-5. doi:10.1155/2014/971490
- Zhang, J., Chen, C., Zhang, X., & Liu, S. (2016). Study on the environmental risk assessment of lead-acid batteries. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 873 – 879. doi:10.1016/j.proenv.2016.02.103