

Estado del arte de materiales alternativos para la elaboración de ladrillos

Karen Tatiana Arango Cuevas y Yurany Yelitsa Larrota Rugeles

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Luis Alberto Capacho Silva

Ingeniero Civil

Codirector

Sergio Ruiz Martínez

Ingeniero civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa académico

Bucaramanga

2020

**Dedicatoria**

*A Dios por darme vida, salud y sabiduría a lo largo de toda mi carrera. A mis padres, Martha Cuevas y Héberth Parodi, por ser mi fuente de inspiración, mi apoyo, mi motor y mi sustento, les debo todo en esta vida. A mi hermana, Deisy Arango, quien fue mi maestra y tutora, su apoyo fue fundamental en mi formación.*

***Karen Tatiana Arango Cuevas***

*A Dios, el forjador de mi vida. A mis padres, Rosalba Rugeles y Alvaro Larrota, quienes con su esfuerzo, dedicación, amor y paciencia me mostraron el camino hacia la superación, son los pilares de mi vida, los amo.*

***Yurany Yelitsa Larrota Rugeles***

### **Agradecimientos**

*Quiero agradecer en primera instancia a Dios por darme vida, agallas y la sabiduría suficiente para culminar esta etapa de mi vida, gracias infinitas a mis padres, Martha Cuevas y Héberth Parodi, por darme la oportunidad de estudiar, por apoyarme, por brindarme con mucho esfuerzo y dedicación todos los medios para salir adelante, pero sobre todo por estar presentes y ser motivo de inspiración en todo momento a lo largo de mi vida.*

*A mi hermana, Deisy Arango, quien es mi ejemplo a seguir, gracias por ayudarme y apoyarme en mi proceso académico, a Luis Carlos, por apoyarme y acompañarme en este camino. A Melanie Galvis, quien estuvo desde el día cero, apoyándome y contribuyendo positivamente en mi carrera y en mi vida. A Silvia Picón, quien llegó para acompañarme en la recta final, por ser incondicional y mi compañera de desvelos. Y a mi compañera, Yurany Larrota, por confiar en mí y acompañarme en la realización de este proyecto.*

***Karen Tatiana Arango Cuevas***

*Quiero agradecer primeramente a Dios por la vida y la posibilidad de compartir este logro con mi familia. A mis padres Rosalba Rugeles y Alvaro Larrota por ser mi apoyo incondicional y creer en mis capacidades. A mis hermanos Anderson Larrota y Alvaro Iván Larrota por ser fuente de inspiración para lograr mis propósitos. A todos y cada uno de los profesores que me formaron a lo largo de mi paso por la universidad, a mi compañera por su dedicación, empeño y confianza durante la realización de este proyecto, para todos, mi total y plena gratitud.*

***Yurany Yelitsa Larrota Rugeles***

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	8
1    Objetivos .....	9
1.1    Objetivo General.....	9
1.2    Objetivos Específicos.....	9
2    Metodología.....	10
3    Resultados .....	11
3.1    Residuos industriales.....	11
3.1.1    Lodos.....	11
3.1.2    Ceniza volante .....	13
3.1.3    Dragado .....	15
3.1.4    Escoria de fundición .....	16
3.2    Residuos Orgánicos .....	19
3.2.1    Biosólidos.....	20
3.2.2    Cáscara de arroz.....	22
3.2.3    Bagazo de caña .....	24
3.2.4    Llantas .....	26

3.2.5 Plástico .....	27
3.3 Residuos de Construcción .....	29
3.4 Aditivos Minerales.....	33
4 Conclusiones.....	40
Referencias Bibliográficas .....	42

## Resumen

**Título:** Estado del arte de materiales alternativos para la elaboración de ladrillos.\*

**Autor:** Karen Tatiana Arango Cuevas, Yurany Yelitsa Larrota Rugeles.\*\*

**Palabras Clave:** Ladrillos, Residuos Orgánicos, Residuos Industriales, Residuos de Construcción, Aditivos Minerales, Propiedades Mecánicas, Durabilidad.

**Descripción:** El ladrillo es uno de los materiales más utilizados en el área de la construcción, su alta demanda y producción ha causado un problema de escasez de reservas de materias primas y genera un gran gasto energético, liberando una importante cantidad de gases a la atmósfera, tales como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO, causando impactos negativos en el medio ambiente. Esto crea la necesidad de diseñar, idear e implementar nuevas metodologías para la producción sostenible de ladrillos estructurales y no estructurales. Este artículo presenta una revisión del estado del arte de diferentes investigaciones, a nivel mundial, sobre la utilización de materiales alternativos, como residuos industriales, residuos orgánicos, residuos de construcción y aditivos minerales, como reemplazo parcial o total de los materiales tradicionales usados en la fabricación de ladrillos, arcilla y concreto. Se describen los procedimientos de preparación, los análisis de muestras y los resultados. Se investigan los efectos de la adición de estos desechos sobre las propiedades físicas y mecánicas, de los ladrillos y se presentan sus principales resultados. La investigación logró demostrar que la incorporación de distintos residuos se podría emplear con éxito en la fabricación de ladrillos, sin generar detrimentos e incluso mejorando sus propiedades físico-mecánicas y durabilidad.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva. Ingeniero Civil. Codirector: Sergio Ruiz Martínez. Candidato a Magister en Ingeniería Civil.

### Abstract

**Title:** State of the art alternative materials for brick making. \*

**Author:** Karen Tatiana Arango Cuevas, Yurany Yelitsa Larrota Rugeles\*\*

**Key Words:** Bricks, Organic Waste, Industrial Waste, Construction Waste, Mineral Additives, Mechanical Properties, Durability.

**Description:** The brick is one of the most used materials in the construction area, its high demand and production has caused a problem of shortage of raw material reserves and generates a great energy expense, releasing a significant amount of gases into the atmosphere, such as CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO, causing negative impacts on the environment. This creates the need to design, devise and implement new methodologies for the sustainable production of structural and non-structural bricks. This article presents a review of the state of the art of different researches, worldwide, on the use of alternative materials, such as industrial waste, organic waste, construction waste and mineral additives, as partial or total replacement of traditional materials used in the manufacture of bricks, clay and concrete. Preparation procedures, sample analysis and results are described. The effects of the addition of these wastes on the physical and mechanical properties of the bricks are investigated and the main results are presented. The research was able to demonstrate that the incorporation of different wastes could be successfully used in the manufacture of bricks, without generating detritus and even improving their physical-mechanical properties and durability.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Alberto Capacho Silva. Civil Engineer. Co-director: Sergio Ruiz Martínez. Candidate for Magister in Civil Engineering.

## Introducción

El ladrillo es el elemento constructivo más viejo elaborado por el hombre, hace más de 10.000 años. Se fabricaban utilizando arcilla, se moldeaban a mano y se secaban al sol. Se usaban para reforzar sus construcciones y recubrir sus muros y murallas, con el paso del tiempo, su elaboración y método de fabricación fueron cambiando, implementando el uso del horno (Gil, 2018). La quema de material como madera (biomasa) y carbón, entre otros, para alimentar los hornos es una práctica que genera una severa carga contaminante a la atmósfera. La emisión de humo contiene CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO por el tipo de combustibles empleados (Sánchez Silva & Zapata Valencia, 2013).

A comienzos del siglo 20, se empezaron a fabricar bloques de concreto, el cual se considera un material sustentable para el medio ambiente generando ahorros energéticos permanentes (Silkeblock, 2017). Actualmente la industria ladrillera tienen una producción anual global de aproximadamente 1391 mil millones de unidades (Sutcu et al., 2019). El uso excesivo de estos recursos genera impactos negativos en el medio ambiente como la alteración del paisaje y la destrucción de la naturaleza (Pineda, 2020). Por otro lado, el manejo inadecuado de residuos sólidos y de desechos, es uno de los problemas ambientales más graves generado por las industrias, provocando grandes impactos de contaminación sobre los suelos, el agua, los ecosistemas y la salud (Pineda, 2020).

Con el fin de proteger el medio ambiente y disminuir la acumulación de estos desechos se han desarrollado diversas investigaciones que evalúan el uso de materiales residuos como materia prima en la producción de ladrillos de arcilla y de concreto, abordando un estudio de sus propiedades, así pues, el objetivo de este estudio es elaborar un estado del arte donde se muestren investigaciones realizadas a nivel mundial acerca del uso de materiales alternativos para la elaboración de ladrillos estructurales y no estructurales.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Elaborar un estado del arte de investigaciones realizadas sobre materiales alternativos para la producción de ladrillos para obras civiles.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Identificar los materiales alternativos para uso en la ejecución de ladrillos.

Describir las técnicas de elaboración de ladrillos con materiales alternativos.

Determinar los efectos del uso de diferentes materiales alternativos en las propiedades de los ladrillos.

## 2 Metodología

El proyecto consistió en recopilar toda la información posible a través de las bases de datos que dispone la Universidad Industrial de Santander, tales como, Elsevier, Scielo, Redalyc.org, revista materia, entre otras, relacionadas con ladrillos alrededor del mundo. De lo anterior se encontraron cerca de 120 artículos; posteriormente se hizo una revisión de toda la información para descartar los artículos cuyo objetivo no fuera la adición de materiales alternativos en la fabricación de ladrillos, que estuvieran repetidos y que tuvieran una ventana de tiempo superior a 15 años, quedando con 60 artículos, aproximadamente. Se filtró la información obtenida de acuerdo con la procedencia del residuo: industriales, orgánicos, de construcción y aditivos minerales, luego se realizó una sub clasificación de acuerdo con el material usado. Finalmente, se hizo una lectura detallada de cada artículo para extraer la información relevante que incluye el material, el método de fabricación, los ensayos con los cuales se determinaron las propiedades físico-mecánicas, los resultados de estos y respectivas conclusiones. Todo esto con el fin de tener dominio sobre el tema y facilitar la redacción del estado del arte sobre materiales alternativos para la elaboración de ladrillos.

### 3 Resultados

Este apartado presenta los resultados obtenidos de la investigación sobre materiales alternativos usados en la fabricación de ladrillos a nivel mundial.

#### 3.1 Residuos industriales

Muchos investigadores han apuntado a la sustitución parcial de materias primas por residuos industriales en su producción (Amin et al., 2017) con la finalidad de dar uso a los desechos y reducir el impacto que tiene sobre los ecosistemas.

##### 3.1.1 Lodos

Se han adelantado investigaciones donde se estudia el porcentaje ideal de incorporación de lodos de distintas procedencias industriales.

(Zhang et al., 2018) descubrieron que la resistencia a la compresión disminuyó de 23.5 a 15.5 MPa, y la absorción de agua aumentó de 2.7% a 3.46% con una adición de lodo de galvanoplastia hasta 10% en peso. Aunque influyó en las propiedades mecánicas y físicas del ladrillo de arcilla cocida, estos parámetros son suficientes de acuerdo con los valores requeridos por las normas (GB 5101-2003, 2003), (GB/T 2542-2012, 2012) y (GB 5085.3-2007, 2007).

(Yaras, 2020) determinó la influencia del uso simultáneo de lodo de fábrica de papel (PMS) y el lodo de carbonatación (CS) en las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los ladrillos a base de arcilla. Para la producción de ladrillos rojos, utilizó CS hasta un 30%, mientras que PMS hasta un 15%. Las adiciones de CS al 15% y CS al 30% dieron como resultado un aumento en la absorción de agua y porosidad aparente, también una reducción en la densidad aparente y la conductividad térmica; en esta última se obtuvieron valores de conductividad térmica que oscilaron entre 0.742 W/mK y 0.155 W/mK. Las tasas de absorción de agua de las muestras de

ladrillo con 5% y 15% de PMS para ambas temperaturas de cocción (1000 °C y 1100 °C) aumentó de 11.6% a 15.5% y de 10.2% a 14.5%, respectivamente. En cuanto a la resistencia a la compresión de los ladrillos se diezma a medida que aumenta la incorporación de PMS en cantidades de 5% a 15% y continuó su disminución en ladrillos que contenían de 15% de CS y 30% de CS.

(Herek et al., 2009), evaluaron las características mecánicas y ambientales al reemplazar parcialmente la arcilla por lodos de lavandería industrial. Esta investigación determinó que con niveles que varían de 0 a 20% en peso la resistencia mecánica es inversamente proporcional al contenido de lodo incorporado, mientras que la absorción de agua es directamente proporcional. Los análisis ambientales demuestran que no hay lixiviación de metales en ladrillos fabricados con hasta un 20% de incorporación de lodo; y de acuerdo con la prueba de solubilización, los ladrillos se clasifican como inertes, es decir, ninguno de los componentes presentes en las muestras en bruto se solubilizó. Por lo tanto, los ladrillos fabricados con la incorporación de lodos de lavandería en masa arcillosa con un contenido de lodos de hasta 20% tienen estabilidad química.

En busca de una mejora en la resistencia, durabilidad y rendimiento térmico de los ladrillos de arcilla y con el fin de mejorar la sostenibilidad ambiental, (Subashi De Silva & Hansamali, 2019) realizaron un estudio sobre la introducción del lodo cerámico en la producción de ladrillos. Este estudio concluyó que se puede lograr un ladrillo ecológico con una resistencia, durabilidad y propiedades térmicas mejoradas reemplazando en un 40% la arcilla de ladrillo con lodo de cerámica, dado que la resistencia a la compresión óptima era de 2.9 N/mm<sup>2</sup>, indicando una mejora de resistencia del 32%, en comparación con el ladrillo convencional, la absorción de agua fue del 20.6%, satisfaciendo el requisito de resistencia moderada a la intemperie de la norma (ASTM C67-07, 2007). Las resistencias ácidas y alcalinas de los ladrillos aumentaron, lo que indica que el lodo cerámico contribuye a incrementar el rendimiento de durabilidad del ladrillo. Además, los ladrillos

con un 40% de reemplazo de arcilla produjeron mejor rendimiento térmico. A las 12:30 p.m., cuando se espera que la temperatura diurna sea la más alta, se observó una diferencia de temperatura de 10.1 °C, entre la cara expuesta a la temperatura y la cara opuesta del ladrillo, para el ladrillo mezclado con lodo cerámico al 40%, mientras que se observó una diferencia de 4.2 °C para el ladrillo convencional.

La investigación publicada por De Oliveira y Lange (Giffoni & Lange, 2005) presenta una forma de reutilizar el lodo de fosfato, a través de su uso como materia prima alternativa para la fabricación de ladrillos. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que los ladrillos con 0% y 10% de residuos se clasifican como un bloque de sellado de clase 10, ya que tienen una resistencia a la compresión entre 1 MPa y 1.5 MPa. El ladrillo fabricado con el residuo de lodo de fosfato cumple con el estándar (NBR 7171:1, 1992), que establece, para los ladrillos, absorción de agua de no menos del 8% ni más del 25%. También se observa que los resultados de la absorción de agua para ladrillos con 0% de residuo fueron bastante similares a aquellos con 10% de residuo. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que el ladrillo que contiene 10% de lodo de fosfato no puede considerarse inerte según los estándares actualmente vigentes, pero tampoco tiene características que lo hagan peligroso desde el punto de vista ambiental, por tanto, se recomienda el uso de residuos de lodos de fosfato para la fabricación de ladrillos en una proporción de hasta el 10% del residuo en relación con la arcilla.

### **3.1.2 Ceniza volante**

La ceniza volante, desecho proveniente del proceso de combustión del carbón para la cocción de ladrillos, también se usó en la elaboración de las piezas cerámicas, debido a la composición química de los polvos de cenizas, el desecho actúa como desgrasante (refuerzo) y alivia las unidades cerámicas gracias a su baja densidad (Roa Bohórquez et al., 2018).

Diferentes autores (Apithanyasai et al., 2020) investigaron la mejor proporción de residuos de arena de fundición (WFS) cenizas (FA) y escoria de horno de arco eléctrico (EAF) para la producción de ladrillos de geopolímero. En esta investigación, las escorias WFS, FA y EAF se mezclaron en una proporción de 70:30:0, 60:30:10, 50:30:20 y 40:30:30 con hidróxido de sodio 8M (NaOH) y 98% de silicato de sodio de pureza ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Los resultados mostraron que los ladrillos de geopolímero con la mayor resistencia a la compresión fueron aquellos mezclados en la relación 40:30:30, con una resistencia a la compresión de 25.76 MPa, estos últimos, también se analizaron utilizando la prueba de lixiviación para garantizar que la producción involucre materiales no peligrosos. Se demostró que el impacto ambiental de la producción de ladrillos de geopolímero fue menor en todos los aspectos que el de la producción de concreto. Por lo tanto, la producción de ladrillos de geopolímero puede reducir el impacto ambiental y puede ser un uso de valor agregado para los desechos industriales.

Otros investigadores (Sutcu et al., 2019) presentaron un estudio experimental sobre las propiedades de los ladrillos que contienen arcilla, cenizas (FA) y cenizas de fondo (BA), subproductos del carbón. Esta investigación muestra que los ladrillos a 1050 °C exhiben una porosidad aparente y absorción de agua ligeramente más bajas, pero una densidad aparente y conductividad térmica ligeramente más altas que aquellas a 950 °C. Los resultados también muestran que un aumento en el contenido de FA conduce a un aumento en la porosidad aparente y absorción de agua, pero una disminución en la densidad aparente y la conductividad térmica de los ladrillos, como también se concluyó luego de aplicar la norma europea (TS EN 771-1, 2005) que los ladrillos que contienen 5% de FA, 5% de BA y 10% de BA exhiben una resistencia a la compresión similar a los que contienen sólo arcilla. Los resultados de lixiviación obtenidos mediante la aplicación de la norma (IWRG631, 2009), muestran que la lixiviación de metales

pesados de ladrillos rojos es inferior al de las concentraciones límite especificadas por la norma mencionada anteriormente.

### 3.1.3 Dragado

La acumulación de sedimentos en el fondo de ríos y lagos es un fenómeno común, que es acelerado por el desarrollo de la sociedad y la economía, por lo tanto, la actividad de dragado juega un papel vital en las vías fluviales y el mantenimiento del medio ambiente natural. Por este motivo algunos investigadores (Peng et al., 2020) trabajaron en una nueva tecnología de ladrillos sin hornear de agregados livianos de sedimentos dragados (WSLA). Según los datos de la investigación, los ladrillos de hormigón con WSLA cumplen con el requisito de las Normas Nacionales chinas (GB/T28635-2012, 2012). La densidad compacta y suelta es de  $1010 \text{ kg/m}^3$ ,  $1054 \text{ kg/m}^3$  respectivamente, que es menor que la densidad de los ladrillos de referencia. Cuanto mayor es la densidad, mayor es la resistencia a la compresión de los agregados, combinada con las características inherentes de los propios agregados. Por lo tanto, la resistencia a la compresión de los ladrillos de referencia es mayor 2.2 veces que el de los ladrillos con WSLA los cuales tuvieron una resistencia a la compresión de 35 MPa.

Otros averiguadores (Slimanou et al., 2020) decidieron realizar un estudio similar, pero con ladrillos de arcilla y determinaron las propiedades fisicoquímicas de los ladrillos cocidos y se compararon con los ladrillos de control (100% en peso de arcilla como materia prima). Los resultados indicaron que la proporción del sedimento dragado y la temperatura de cocción fueron los dos factores clave para determinar la calidad de los ladrillos cocidos en términos de propiedades mecánicas y térmicas. Los ladrillos con 20% y 15% en peso de sedimentos dragados, cocidos a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  mostraron un aumento en las propiedades mecánicas de 32.53% y 20.63% respectivamente. Además, las conductividades térmicas de todas las muestras son bajas; tienen un

rango de 0.43 a 0.24 y de 0.46 a 0.21 W/(m×K) para los ladrillos cocidos a 950 °C y 850 °C respectivamente.

### **3.1.4 Escoria de fundición**

Santacruz y Torres (Santacruz Torres & Torres Agredo, 2019) por su parte, realizaron una investigación sobre la viabilidad técnica de la incorporación de las escorias de fundición secundaria de plomo en la producción de ladrillo, las cuales son el subproducto del reciclaje del plomo contenido en las baterías usadas. Este residuo puede ser considerado un importante factor de contaminación del aire, suelo y agua cuando no es bien estabilizado (Santacruz Torres & Torres Agredo, 2019). Los resultados de los ensayos reportados en este estudio mostraron la viabilidad técnica y ambiental de incorporar hasta un 15% de escoria en ladrillos estructurales de perforación horizontal. La contracción de secado, absorción de agua y resistencia a la compresión se vieron mejoradas en los ladrillos preparados con escoria, en todas las temperaturas evaluadas (900 °C a 1050 °C), en relación con los ladrillos de control. La resistencia a la compresión aumentó con la temperatura de cocción, además, se redujo la absorción de agua. Los resultados mostraron la inmovilización de plomo y arsénico en la matriz cerámica, por lo que se logró estar bajo los límites establecidos por las normas estándar de calidad (NTC 4205-2004, 2004) y la legislación colombiana (Decreto 4741 de 2005, 2005).

Para cumplir con los requisitos de material de aislamiento térmico en los edificios, algunos investigadores (Li et al., 2019) fabricaron ladrillos con alta porosidad, alta resistencia y baja conductividad térmica mediante tecnología de fundición de gel de espuma hidratada con método de sinterización sin presión utilizando residuos industriales de hierro como materia prima. Los ladrillos se prepararon con éxito obteniendo como resultado ladrillos con porosidades de 70.5% - 88.8%, con densidad aparente de 0.80 g/cm<sup>3</sup> - 0.29 g/cm<sup>3</sup>. También se observó que cuando la

porosidad aumenta de 70.5% a 88.8%, la conductividad térmica de las muestras porosas disminuye de 0.13 a 0.036 W/(m×K).

Con un propósito similar, Farnood et al. (Farnood Ahmadi et al., 2018) para disminuir la pérdida de energía de los edificios durante la fase de operación, y también teniendo en cuenta la importancia de la construcción sostenible, fabricaron ladrillos aislantes compuestos de perlita expandida (EP), zeolita natural, escoria granulada de alto horno (GGBFS) y arcilla. Se investigó el efecto de reemplazar la arcilla con GGBFS, zeolita y EP en cantidades de hasta 15%, 15% y 50%, respectivamente, en las propiedades de los ladrillos. Una vez incorporados los residuos de zeolita y EP, la densidad aparente disminuyó en los ladrillos; contrario a esto, la adición de GGBFS aumentó la densidad aparente de los ladrillos. Finalmente, la resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla que contenían una combinación de zeolita, GGBFS, EP y agua osciló entre 36.44 y 6.82 MPa; el máximo valor pertenecía al ladrillo de referencia. Todos los ladrillos obtuvieron una resistencia superior al mínimo requerido de 3 MPa de acuerdo con los estándares de la norma Iraní (INSO 7-2016, 2016). La sustitución de arcilla por 15% de zeolita, 7,5% de GGBFS y 50% de EP y con agua aproximadamente del 17% en peso del peso total dio como resultado un aumento de la absorción de agua del 78.3%, un aumento de la porosidad aparente del 46.7%, y una disminución en el coeficiente de conductividad térmica del 80.5%. Los ladrillos tuvieron una pérdida de peso admisible por debajo del 3% en peso que satisface los requisitos de (ASTM C67-14, 2014).

Otro residuo industrial potencialmente útil para la fabricación de ladrillos es el denominado “Grits” este es un residuo sólido con características arenosas y color grisáceo, generado por la industria de la pasta de papel Kraft. El objetivo del trabajo realizado por (Miranda et al., 2011) fue estudiar el potencial de las arenas como material de construcción, considerando su empleabilidad

en la fabricación de ladrillos de cemento. Los ladrillos se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión y absorción. En cuanto a la resistencia a la compresión, a los 28 días todos los golpes mostraron valores promedio más altos que los establecidos por la norma (ABNT NBR 7182:1986, 1986), que es de 2.0 MPa. Los ladrillos fabricados con una mayor cantidad de Grits mostraron un mejor rendimiento con respecto a la resistencia mecánica. Así, este estudio no solo presenta el beneficio ambiental de disponer correctamente de los desechos, sino que también contribuye con nuevos materiales para la construcción civil.

Por otra parte el trabajo realizado por (El-Naggar et al., 2019) sugiere un método económico para producir ladrillos de geopolímero aislante de baja densidad, utilizando cal apagada residual junto con una cantidad mínima de soda cáustica como activador y dos desechos puzolánicos sólidos finos producidos a partir de la fabricación de ladrillos de arcilla (desechos de ladrillos de arcilla) y desecho de caolín desaluminado de la producción de alumbre como aglomerantes, en cuanto a la porosidad, se genera a través de la acción de la cal apagada y el hidróxido de sodio en los desechos de recortes de aluminio. En este estudio se concluyó que la sustitución del polvo residual de ladrillos de arcilla por caolín desaluminado en un 15%, en peso, y el uso de aluminio al 5%, en peso, da como resultado un ladrillo óptimo para fines de aislamiento, con una densidad aparente de aproximadamente  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ , una resistencia a la compresión de 28 días de 1.4 MPa y una conductividad térmica de  $0.26 \text{ W/(mK)}$

Con el mismo concepto, usar residuos industriales, la investigación realizada por (Baghel et al., 2019) se enfocó en dos desechos industriales, escama de laminación y lechada de mármol, como material base en ladrillos de concreto. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, aislamiento térmico y absorción de humedad donde se concluyó que la resistencia a la compresión de la muestra aumenta cuando aumenta el porcentaje de la escama de laminación, como reemplazo

parcial de los agregados finos, y es máximo en la muestra que tiene una escama de laminación del 20%. A medida que aumentaba el porcentaje de escama de laminación en las muestras, la conductividad térmica de las muestras también aumentó. La absorción de agua disminuyó cuando el porcentaje de suspensión de mármol disminuyó en las muestras, ya que la suspensión de mármol es un buen absorbente de agua. A medida que aumentaba el porcentaje de escama de laminación, la absorción de agua disminuyó.

(Wang et al., 2019) con el propósito de encontrar uso a los residuos eléctricos de manganeso (EMR), desecho sólido generado como subproducto durante la producción electrolítica de manganeso metálico, elaboraron ladrillos permeables no sinterizados. Se investigaron las propiedades mecánicas y ambientales de las cuales se concluyó que la resistencia a la tracción pudo alcanzar un valor de 3.53 MPa y el coeficiente de permeabilidad un valor de  $3.2 \times 10^{-2}$  cm/s de los ladrillos permeables no sinterizados a los 28 días, que son valores más altos que los requisitos en (GB/T 25993-2010, 2010). Los resultados de lixiviación muestran que los ladrillos permeables no sinterizados tienen una excelente capacidad de solidificación no sólo para Pb, Cd, Cr total, As, Hg, sino que también solidifican completamente las concentraciones extremadamente altas de Mn en EMR. Por lo tanto, los ladrillos permeables no sinterizados preparados usando EMR son aceptables en términos de desempeño ambiental.

### **3.2 Residuos Orgánicos**

Los residuos orgánicos son residuos biodegradables de origen animal o vegetal, los cuales pueden degradarse rápidamente (CSP, 2018), estos residuos tienen un fuerte impacto sobre el medioambiente, contaminando la atmósfera, el agua y los suelos, a causa de sus altos contenidos en materia orgánica (RSU, 2019).

### 3.2.1 Biosólidos

Los biosólidos son residuos orgánicos que resultan del tratamiento de las aguas residuales procesadas. La disposición de estos biosólidos, demanda un manejo cuidadoso por los riesgos ambientales que pueden representar, ante la posibilidad de contener sustancias contaminantes (Vélez, 2007), es por esto que, actualmente se viene estudiando el aprovechamiento de biosólidos como adiciones residuales en la elaboración de materiales cerámicos.

Diferentes autores (Fuentes et al., 2018) evaluaron el comportamiento físico-mecánico de la mezcla de arcilla con lodos residuales en unidades experimentales para su uso como material de construcción no estructural. Se elaboraron 60 ladrillos cerámicos con diferentes porcentajes de adición (5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso) para ser cocidos a temperaturas de 800 °C, 900 °C y 1000 °C y compararlo con ladrillos 100% de arcilla mediante pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua. Los ladrillos fueron de 5 cm de ancho, 5 cm de alto y 10 cm de largo y un peso promedio de 0.36 kg de peso neto. Los ladrillos cerámicos con porcentaje de adición de biosólidos de 5%, 10% y 15%, cocidos a una temperatura de 1000 °C, presentaron resistencias superiores a los ladrillos hechos 100% de arcilla, con una resistencia promedio de 27.1 MPa, cumpliendo con los estándares establecidos en la norma NTC-4017 (ICONTEC, 2005).

Otros autores estudiaron el uso de cenizas de lodo de depuradora (CLD), (Pérez et al., 2013) utilizando este material en sustitución de árido fino en bloques de hormigón prefabricados en diferentes cantidades (0%, 5%, 10% y 15% en peso). Se realizaron 16 ladrillos para obtener la resistencia a la compresión y 6 para el resto de los ensayos para cada una de las mezclas. Después de un sólo golpe de compactación-vibración, los moldes se retiraron inmediatamente y los bloques se curaron al aire a temperatura ambiente durante 28 días. En función con los resultados, se puede concluir que la fabricación de bloques de hormigón con un porcentaje de sustitución del 15% de

CLD, permite mejorar sus propiedades físico-mecánicas en comparación con los ladrillos de control, incrementando en un 31.4% la resistencia a compresión, cumpliendo lo establecido por la norma europea EN 771-3 (UNE, 2011).

En paralelo, otros autores (Ottosen et al., 2020) estudiaron el uso de CLD-SED, que es el resultante de la recuperación de contenido de fósforo mediante separación electro-dialítica, y CLD, en reemplazo de la arcilla en diferentes cantidades (0%, 10%, 30% y 50% en peso), y comparar sus propiedades físico-mecánicas. Las muestras de CLD se cocinaron a una temperatura de 1000 °C, mientras que los de CLD-SED, se cocieron a 950 °C, 1000 °C y 1050 °C por 2 h, utilizando una velocidad de calentamiento de 6 °C/min. Al realizar los ensayos, se determinó que CDL-SED tiene propiedades similares a CLD, cuando en los dos casos hay un reemplazo del 10% y su cocción es de 1000 °C; bajo estas condiciones, ambos pueden usarse de manera potencial en la elaboración de ladrillos.

Por otro lado, P. Pokhara et al. (Pokhara et al., 2019) evaluaron si el lodo de alúmina activada (AA) podría usarse parcialmente en la fabricación de ladrillos arcillosos que son estructuralmente estables y no contaminantes. El lodo AA se mezcló de forma variable con arcilla (0%, 5% y 10% en peso), se moldearon los ladrillos y se dejaron secar al sol por 3 días, posteriormente se colocaron en un horno por 21 días a una temperatura aproximada de 900 °C. Los ladrillos fabricados fueron llevados al laboratorio para determinar sus propiedades físicas y de lixiviación, para esto se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión, los resultados se compararon con los valores mínimos requeridos por las normas (IS3495:1992, 1992), (IS1905:1987, 1987), (IS1077:1992, 1992) y se estableció que un máximo de 10% de reemplazo puede ser utilizado en la fabricación de ladrillos de arcilla estructural.

### 3.2.2 Cáscara de arroz

El uso de la cáscara de arroz y la ceniza de cáscara de arroz se han venido investigando con el fin de mejorar las características físicas y mecánicas de materiales de construcción (Akasaki & Silva, 2001).

P. Milak et al. (Milak et al., 2017) valorizaron la ceniza de cáscara de arroz (CCA) para la producción de materiales cerámicos con mejores propiedades físico-mecánicas (ISO10545-3, 2004; ISO10545-4, 2004) y de aislamiento térmico (Hamad & Jhattab, 1981). Se prepararon cinco composiciones reemplazando parcialmente el contenido de arcilla, por CCA en diferentes cantidades (0%, 8%, 12%, 16% y 20% en peso). Se extruyeron los polvos húmedos, obteniéndose muestras cilíndricas con dimensiones nominales de 12 mm de diámetro y 160 mm de alto. Los cuerpos cerámicos producidos se secaron a temperatura ambiente durante 5 días y luego a 110 °C en un secador de laboratorio hasta peso constante. Después de secar, los polvos compactos se quemaron en un horno de mufla a 965 °C durante 2 h, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Los resultados mostraron la viabilidad de usar CCA hasta 12% en peso, con una baja reducción de la resistencia a la flexión y una gran reducción de la conductividad térmica, con respecto a los ladrillos con 0% de CCA.

Investigadores (Medeiros et al., 2010) estudiaron las propiedades físico-mecánicas de masas cerámicas con la incorporación de residuos de CCA y cenizas de leña (CL), las mezclas se produjeron con variaciones en las composiciones con residuos entre 0% y 50% y arcilla de 50% al 100%. Las piezas se secaron en un horno a 100 °C durante 24 horas. Después del secado, la cocción se llevó a cabo en un horno de mufla a temperaturas de 800 °C, 900 °C y 1000 °C, y velocidad de calentamiento de 2 °C/min para obtener las condiciones de combustión de la industria. Posteriormente, se realizaron las pruebas pertinentes y, según los resultados, los ladrillos con

33.4% de CL, 8.6% de CCA y 58% de arcilla, cocidos a una temperatura de 800 °C producen ladrillos con menor absorción y mayor módulo de ruptura, en comparación con los ladrillos hechos 100% de arcilla, cumpliendo lo establecido en la norma (ABNT, 1967).

Otros (Ferreira et al., 2018) consideraron el uso de biomasa vegetal que ha mostrado un gran potencial para su reutilización en el área de la construcción civil. Los factores de variación fueron los tipos de residuos, en dos niveles (cáscaras de arroz y brachiaria), como reemplazo del cemento, en ladrillos de suelo-cemento, en cinco niveles (0%, 10%, 20%, 30% y 40%), y las edades de los ladrillos, en cinco niveles (7, 28, 56, 91 y 182 días). La adición de la cáscara de arroz proporcionó valores de resistencia a la compresión simple superiores a los proporcionados por la cáscara de brachiaria, en los niveles correspondientes, en todas las edades de curado, adoptando 1.5 MPa como el valor mínimo de resistencia a la compresión simple a los 7 días, el reemplazo parcial del contenido de cemento por residuo se puede realizar en tratamientos con 10% de cáscara de arroz y brachiaria, respectivamente.

Algunos investigadores (Luna-Cañas et al., 2014) realizaron un estudio comparativo sobre el uso de varios desechos agroindustriales (cáscara de arroz, cáscara de cacao, aserrín y caña de azúcar) en la fabricación de ladrillos. Se eligieron diferentes cantidades de estos residuos (0%, 5%, 10% y 20%) para el diseño de la mezcla, también se elaboraron muestras de control sin adición de residuos. La resistencia a la compresión de los materiales cerámicos es el índice de calidad de ingeniería más relevante para la construcción, y los ladrillos a base de cáscara de cacao obtenidos a 800 °C tenían la mejor calidad. Después de realizar las pruebas necesarias, se determinó que los usos de estos residuos podrían aplicarse en la producción de ladrillos, según las normas (ASTM C67-11, 2011), (ASTM D2166-00e1, 2004), (ASTM D1635-00, 2006), sin embargo, los resultados

indicaron que la mezcla de 10% de cáscara de cacao y 90% de suelo arcilloso, poseen propiedades mecánicas similares a las de los ladrillos de arcilla sin la adición de residuos.

(Phonphuak et al., 2019) estudiaron las características y el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo de arcilla cocida con la adición de cáscara de arroz (CA). Para comparar el ladrillo de arcilla (0% CA) y los ladrillos de arcilla con CA (2.5%, 5%, 7.5% y 10% en peso), cada lote de muestras se mezcló usando un molino de bolas para obtener una mezcla homogénea. Luego, cada uno se mezcló con 20-25% de agua para mejorar la condición plástica de la mezcla. Las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 24 h, y luego se secaron a  $110\pm 5$  °C durante 24h para eliminar el contenido de agua. Las muestras fueron cocidas a 900 °C, 1000 °C y 1100 °C. La etapa de cocción se llevó a cabo en un horno eléctrico utilizando una velocidad de calentamiento de 2 °C/min. De manera concluyente, los resultados revelaron que los ladrillos de CA y arcilla tenían una densidad menor debido a las características de formación de poros de la CA en comparación con el ladrillo de arcilla de control sin CA. Los resultados revelaron que la adición de 2.5% de CA cocido a 1100 °C podría considerarse potencial a las materias primas utilizadas en la fabricación de ladrillos ligeros de arcilla cocida, lo cual es suficiente para las normas (ASTM C373-14a, 2014) y (ASTM C773-88, 2011).

### **3.2.3 Bagazo de caña**

El procesamiento de la caña de azúcar genera residuos, incluidas las cenizas de la quema del bagazo de la caña de azúcar utilizado en las calderas de las plantas de procesamiento. En estudios realizados se concluyó que la cantidad de bagazo variaba de acuerdo con el contenido de fibra de caña de azúcar y era de aproximadamente 260 kilos de bagazo por tonelada de caña de azúcar procesada (Jordan et al., 2019).

Por lo anterior, diversos estudios evalúan la posibilidad de incluir cenizas de bagazo de caña en la producción de ladrillos, con el propósito de promover la sostenibilidad del medio ambiente, mediante el uso de materiales que de otro modo se descartarían. De hecho, (Jordan et al., 2019) realizaron una investigación con el fin de evaluar el efecto de las cenizas de bagazo de caña de azúcar sobre la resistencia a la compresión y el índice de absorción de agua de los ladrillos de cemento y suelo. Las cenizas se tamizaron sin tratamiento químico y/o físico para reflejar el uso de este material en procesos de fabricación reales. Los resultados sobre la absorción de agua indican que la adición de la ceniza del bagazo de caña sin tratamiento aumentó la porosidad de los ladrillos y disminuyó en gran medida la resistencia a la compresión del material, sin embargo, estaba dentro de los límites establecidos dentro de la (ABNT NBR 10836, 2013). Estos resultados indican que es necesario pre-tratar la ceniza para mantener o mejorar las propiedades físicas de los ladrillos.

Del mismo modo, (Maza-Ignacio et al., 2020) evaluaron el efecto del reemplazo parcial de arcilla con desechos agrícolas e industriales sobre las propiedades de resistencia y durabilidad de los ladrillos cocidos. En la primera fase de este estudio, la arcilla fue reemplazada parcialmente por cenizas de bagazo de caña de azúcar no tratadas (UtSCBA), y en la segunda fase por combinaciones de UtSCBA más cenizas volantes (FA) y UtSCBA más humo de sílice (SF). Los ladrillos cocidos se analizaron para determinar la contracción lineal, la densidad aparente, la porosidad aparente, la absorción de agua, la tasa inicial de absorción, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Se descubrió que los ladrillos hechos con 70% de arcilla, 20% UtSCBA y 10% de SF cocidos a 1100 °C son solo 2.08% más resistentes a la compresión, 84% más resistentes a la flexión, y solo 7.03% más livianos que los ladrillos de control; sin embargo, con esta mezcla el uso de arcilla se reduce hasta en un 30%, por otro lado, los ladrillos hechos con 50%

de arcilla, 40% de UtSCBA y 10% de FA, cocidos a 900 °C, tienen una contracción total 46.22% menor que la mezcla de control. De lo anterior, es posible concluir que el reemplazo de arcilla en las dos fases es viable para la elaboración de ladrillos.

### **3.2.4 Llantas**

Anualmente, los océanos reciben más de dos millones de neumáticos que son desechados, los cuales impactan negativamente el medio ambiente (LaVerdad, 2018). Muchos investigadores, han estudiado el uso de estos como material alternativo para la elaboración de ladrillos.

(Silva et al., 2017) quisieron demostrar la viabilidad del uso de gránulos de caucho de neumáticos desechados en la fabricación de ladrillos de concreto comunes, se utilizó cemento tipo Portland, arena natural, residuos de caucho y agua. Para la elaboración de los ladrillos se utilizó 0%, 5%, 10% y 20% en peso de gránulos de neumático para reemplazar el agregado fino, posterior a la fabricación de los bloques se realizaron diferentes ensayos como la prueba de resistencia a la compresión simple y prueba de absorción, los resultados determinaron que es posible reemplazar el agregado fino hasta un 20% por caucho sin una pérdida significativa de resistencia, cumpliendo los requisitos de la norma (ASTM NBR 8492, 2012) lo que quiere decir, que los bloques con la adición de caucho son una alternativa técnicamente viable con un gran potencial sostenible.

De igual manera, (Mohammed et al., 2018) estudiaron el desarrollo de ladrillos recubiertos de goma utilizando caucho desmenuzado, para determinar el número de mezclas y sus ingredientes correspondientes, se usó la metodología de superficie de respuesta. Se utilizó ceniza volante, goma de caucho y soluciones activadoras. Se llevaron a cabo un total de trece mezclas de prueba, se fabricaron los ladrillos de geopolímero de goma y se probaron para verificar la resistencia a la compresión, módulo de ruptura, absorción de agua y tasa inicial de absorción, siguiendo los estándares de la (ASTM C67-14, 2014); las pruebas indican que hubo una reducción en la

resistencia a la compresión y flexión obteniendo como resultado, 3.98 MPa y 0.258 MPa, respectivamente, pudiendo ser usados como ladrillo no estructural, por lo anterior, los autores recomiendan realizar una adición de nano sílice con el fin de aumentar la resistencia en los ladrillos.

Diferentes investigadores (Thakur et al., 2020) estudiaron el uso de miga de caucho residual en reemplazo parcial de agregados finos para el desarrollo de ladrillos. Los materiales utilizados para producir las muestras fueron: cemento portland, agregado fino, agregado grueso, caucho desmenuzado y agua. Se prepararon un total de 5 mezclas con porcentajes variables de caucho desmenuzado, incluida la mezcla de control (0%, 5%, 10%, 15% y 20%), con una relación agua/cemento de 0.43. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y a la tracción en las muestras después de 28 días de curado, de acuerdo con (IS 2185-1, 2005) y (ASTM C1006-07, 2007), respectivamente. En el caso de la tasa inicial de absorción de agua, que se realizó mediante la norma (ASTM C67-19, 2019), el incremento se observó hasta el 10% de reemplazo, luego se encontró que era constante de 10 a 15% y luego disminuyó con el aumento del caucho desmenuzado. La resistencia a la compresión y a la tracción mostró una disminución lineal con el aumento en el porcentaje de caucho desmenuzado en el caso de la mezcla con 20% en comparación con la mezcla de control, a su vez, se observó que la absorción de energía aumentó en 3.66 veces.

### **3.2.5 Plástico**

La producción global de plásticos se ha disparado en los últimos 50 años. De hecho, en la última década se ha producido más plástico que en toda la historia de la humanidad (Greenpeace, 2015).

Debido a lo anterior, (Gaggino, 2008) utilizó como materia prima, plásticos reciclados. Se utilizaron diferentes clases de plástico, polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta

densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), entre otros, en 42.6%, 18.7%, 10.5%, 11.5%, 4.7% 10.8% y 1.2% respectivamente. Para la fabricación de los elementos constructivos se utilizó un procedimiento similar al de un hormigón común. La mezcla de hormigón es vertida en una máquina de fabricar ladrillos y en moldes de tipo manual, luego se desmoldan y se curan por 28 días, y así poder ser utilizados en obra. A estos ladrillos se le realizaron ensayos de conductividad térmica, resistencia mecánica, absorción de agua, de acuerdo a las normas IRAM de construcción (IRAM, 2003). El resultado de dichos ensayos determinó que la calidad técnica de los productos de esta tecnología posibilita su utilización como elementos de cerramiento exterior e interior no estructural de viviendas.

Otros autores (Mohajerani & Karabatak, 2020) usaron residuos como el microplástico (MP), nanoplastico (NP), sintéticos, metales pesados y nanopartículas de ingeniería y arcilla. En este estudio se identificó que la incorporación de 15% de estos residuos en mezclas de ladrillos de arcilla cocida produce ladrillos con propiedades similares a las de los ladrillos de arcilla, y resultaron en ahorros de energía de hasta 29.2%. Los autores de dicha investigación proponen una incorporación mínima de 7% de residuos plásticos en la producción de ladrillos de arcilla cocida.

También, (Akinyele et al., 2020) investigaron la reutilización del PET como adición a los ladrillos producidos con arcilla. Se utilizó plástico PET molido de entre 1 y 8 mm, suelo laterítico, arcilla y agua. La relación agua-arcilla de diseño fue 0.5, esto para evitar un barro plástico o rígido. La dosificación de los componentes del ladrillo se realizó mediante pesaje, por cada 100 kg de suelo laterítico, se utilizaron 5, 10, 15 y 20 kg de PET para reemplazar la proporción de arcilla eliminada de las muestras. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión, y la absorción de agua, siguiendo los lineamientos de la norma (ASTM C62-04, 2004). Esta

investigación ha dado la posibilidad de utilizar PET como sustituto en ladrillos cocidos, si la cantidad a utilizar es inferior al 5% y cocidos a una temperatura de entre 700 °C y 900 °C.

### **3.3 Residuos de Construcción**

Los residuos de construcción y demolición son materiales de desecho, que provienen de cualquier tipo de obra civil que se haya rehabilitado o demolido, ya sea una obra pública o privada (Cabrera et al., 2017).

A nivel mundial se producen, al año, cerca de 10 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición, lo cual es una cifra alarmante (Bio Service, 2011). Sin embargo, se puede ver que, en países como Dinamarca, Finlandia, Alemania, Irlanda y Luxemburgo, se reutilizan más del 50% de esos materiales, el restante, se desperdicia contaminando el medio ambiente (Bio Service, 2011). Más alarmante aún, es lo que sucede en Colombia, donde se recicla y reutiliza entre 5% y 10% de estos materiales (UAESP, 2010).

Debido a la falta de control en relación con la generación de estos residuos, se han venido haciendo diferentes investigaciones sobre el uso de residuos de construcción y demolición como material alternativo para la elaboración de ladrillos.

Por lo anterior, algunos autores (Figueiredo & Silva, 2011) incorporaron residuos de demolición de construcción civil (RD) en ladrillos de cal y tierra, reemplazando parte del aglutinante (cal) con el fin de evaluar la durabilidad de los ladrillos, haciendo 4 mezclas con cantidades de 0%, 25%, 50% y 75%. Se moldearon en moldes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de alto. Después del moldeo, las muestras fueron sometidas a períodos de curado de 28, 60 y 90 días en una cámara húmeda con 100% de humedad relativa. Se evaluó la durabilidad de los ladrillos utilizando el método de envejecimiento acelerado, el cual consiste en exponer el material a cambios rápidos pero controlados de temperatura, humedad, presión, etc., para simular sus

efectos a largo plazo (CONSTRUMÁTICA, 2018). Después del curado, las muestras se sometieron a 12 ciclos de humectación y secado, al final de cada ciclo, se tomó una muestra de 5 muestras y se sometió a la prueba de resistencia a la compresión simple. Después de realizar todas las pruebas de resistencia a la compresión simple, pruebas de absorción de agua, entre otras, se concluyó que el residuo de demolición presentaba composición química favorable a la actividad puzolánica; las muestras de cal y tierra incorporadas con un 25% de residuos de demolición presentaron valores de resistencia a la compresión simple más altos y las muestras sometidas a envejecimiento, después de 90 días de curado, mostraron los mejores resultados.

De manera similar, (dos Reis et al., 2020) incorporó RD como aditivo principal con el objetivo de investigar las propiedades físicas y químicas del ladrillo cocido y explorar sus características térmicas. El material de arcilla y los RDs se combinaron para producir mezclas homogéneas que contengan un 20% en peso de agua, con una plasticidad adecuada. Las mezclas se prepararon con las siguientes proporciones de masa de RD en la mezcla seca total: 0%, 30%, 50%, 70% y 100%. Las muestras de ladrillos se formaron mediante un proceso de extrusión y se compactaron con una fuerza de 20-22 kN. Posteriormente, las muestras se secaron y se quemaron a las temperaturas máximas de 800 °C y 1000 °C. Finalmente, cuando estuvieron fríos, se le realizaron pruebas de densidad, de resistencia a la compresión, entre otros, de acuerdo con los estándares franceses (AS/NZS 4456:2003, 2003). Se puede concluir que tanto la temperatura de cocción como el contenido de RD influyeron en la resistencia a la compresión de los ladrillos cocidos, los ladrillos cocidos a 800 °C presentaron las mayores resistencias a la compresión en comparación con los ladrillos cocidos a 1000 °C, en cuanto a la adición, el 70% de RD produjo una mayor resistencia a la compresión en los ladrillos a ambas temperaturas (800 °C y 1000 °C).

El árido reciclado proveniente de demoliciones de pavimento fue estudiado por (Valdés & Rapimán, 2007), para ser usado en bloques prefabricados de hormigón y posteriormente verificar el grado de cumplimiento de la normativa chilena (NCh 181 Of. 67, 1967). Para la elaboración de estos bloques se utilizó cemento, áridos naturales y áridos reciclados. Para calcular las proporciones de los distintos materiales utilizados en las mezclas se utilizó el método de dosificación Faury – Joisel (Zabaleta, 1996), que se basa en determinar las proporciones de los áridos en base al mejor ajuste a una curva granulométrica de referencia, en la que se considera al cemento como un elemento más de la mezcla. Se hicieron dos tipos de mezclas, una compuesta sólo de áridos naturales (AN) y la otra compuesta por áridos gruesos reciclados y árido fino natural (AR). Ambos tipos de mezclas fueron diseñadas para obtener una resistencia a la compresión de 15 MPa a los 28 días. Los estudios realizados demuestran que los bloques con AN y AR pueden ser utilizados como elementos constructivos estructurales ya que cumplen los estándares exigidos por la normativa (NCh 181 Of. 67, 1967), demostrando que el promedio de resistencias a la compresión debe ser superior a  $45 \text{ kg/cm}^2$ . Los bloques confeccionados con 15% de AR, presentan una disminución de resistencia a la compresión, en comparación con los confeccionados completamente por AN.

(Fiala et al., 2020) buscaban mejorar las propiedades acústicas de bloques de ladrillo utilizando escombros de ladrillos (BR) junto con macropartículas de ladrillos (BM), como relleno, en diferentes dosis.

Para realizar los experimentos acústicos, se diseñaron cámaras de reverberación, las cuales estaban hechas de una capa de hormigón y protegidas con aislamiento acústico de poliuretano. Se colocó un altavoz de frecuencia de amplio rango en una de las cámaras para realizar el experimento. Luego, ambas cámaras se equiparon con bandas de goma y se agregaron micrófonos

precisos para monitorear los niveles de presión del sonido en ambas cámaras. Los bloques de ladrillo estudiados se envolvieron con cáscaras de hormigón alineando la muestra en la posición correcta entre las cámaras de reverberación, lo que permitió realizar mediciones acústicas con una precisión suficiente, mostrando una disminución en los niveles de presión acústica de 10.6-11.7 dB. Los resultados revelaron que la utilización de BR y BM en los bloques fue prometedora, ya que las muestras con relleno mejoraron las propiedades acústicas entre 40% al 47% en comparación con la muestra sin relleno. Según los resultados obtenidos, utilizar los desechos de ladrillos es altamente significativo desde el punto de vista acústico.

(Gencel et al., 2020) investigaron los efectos de los desechos de concreto sobre las propiedades físico-mecánicas, térmicas y de durabilidad de los ladrillos de arcilla cocida. Los desechos tuvieron un proceso de molienda y fueron reemplazados con arcilla hasta el 15% en peso. Las muestras se moldearon en forma de gránulos cilíndricos en prensa uniaxial y luego se quemaron en el horno a 1000 °C y 1100 °C por 2 h. Para conocer las propiedades de estos ladrillos, se hicieron pruebas de absorción de agua, porosidad aparente, resistencia a la compresión, conductividad térmica, análisis de lixiviación, entre otros. Se observó que los valores de pérdida por porosidad y absorción de agua aumentan ligeramente, mientras que los valores de resistencia a la compresión y conductividad térmica disminuyen dependiendo del incremento en el contenido de residuos de concreto. A pesar de que el ladrillo que contiene 2.5% de desperdicio de concreto da mejores resultados, los ladrillos que contienen desperdicio de concreto de hasta 15% presentan una resistencia a la compresión superior a 7 MPa según norma (TS EN 771-1, 2005), que es el límite mínimo. Se puede concluir que los desechos de concreto se pueden usar en la producción de ladrillos de arcilla roja.

Por otra parte, (Zhou, 2018) estudió la viabilidad de utilizar escombros no sólo de hormigón, sino también lodo dragado y residuos de vidrio, para producir ladrillos permeables ecológicos. Los residuos se secaron, se trituraron y molieron hasta tamaños adecuados, el contenido de residuos de vidrio fue de 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90% en peso, y las relaciones de peso del lodo dragado a los residuos de vidrio fueron 4:0, 3:1, 2:2 y 1:3, las mezclas se homogenizaron y se prensaron en ladrillos. Los ladrillos obtenidos se secaron a una temperatura de 100 °C en condiciones ambientales durante 12 h y quemaron en un horno en un rango de temperatura de 1100 °C a 1200 °C con una velocidad de calentamiento de 4 °C/min. Después de llegar a la temperatura deseada durante 30 minutos, los ladrillos se enfriaron a temperatura ambiente. La viabilidad del uso de bloques desechados como agregado, residuos de vidrio y lodo dragado como aglutinante mixto para producir ladrillos permeables se estudió mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión, pruebas de permeabilidad al agua, pruebas de porosidad, imágenes SEM y análisis XRD. Los resultados mostraron que con una adición del 70% de bloques desechados, una relación en peso de lodo dragado y residuos de vidrio de 3:1 y cocidos a una temperatura de 1140 °C, se logró un equilibrio entre la permeabilidad al agua y la resistencia a la compresión.

### **3.4 Aditivos Minerales**

La minería produce grandes cantidades de desechos minerales, las cuales causan problemas económicos y ambientales, es por esto que los investigadores están haciendo esfuerzos para reducir la cantidad de desechos y encontrar usos alternativos como materiales compuestos de construcción (Chandra, 1977).

Algunos investigadores (Javed et al., 2020) sugirieron la incorporación sostenible de bentonita pulverizada en ladrillos de arcilla comprimida estabilizada con cal, sin cocer y

compararlo con ladrillos cocidos. La bentonita se utilizó en 0%, 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente con la arcilla, manteniendo constante el 5% de cal viva para todas las mezclas. Se prepararon ladrillos tanto comprimidos como sin comprimir (cocidos y sin cocer) según las especificaciones de la norma (ASTM C62-13, 2013) para ladrillos de construcción. Los ladrillos comprimidos se moldearon bajo una presión de 5 MPa para lograr la densidad de moldeo más alta para todas las mezclas compuestas y se secaron durante 7 días, para evitar cualquier variación en términos de edad durante la comparación, las muestras de ladrillos comprimidos y sin comprimir se curaron a  $25\pm 3$  °C y una humedad relativa del 90% durante 60 días. Los ladrillos sin comprimir se quemaron en un horno eléctrico a una temperatura máxima de 800 °C y 1000 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y 15 °C/min, respectivamente, durante 4 horas para evitar tensiones térmicas. Las muestras quemadas se enfriaron a temperatura ambiente, finalmente se le realizaron distintas pruebas para determinar sus propiedades y se determinó que añadir bentonita en un 20% resulta útil en la fabricación de ladrillos de arcilla comprimida. Además, con este porcentaje de bentonita, la conductividad térmica en los ladrillos comprimidos disminuye un 47.22%. Por lo tanto, los ladrillos de arcilla comprimidos tienen aplicaciones potenciales en eficiencia energética debido a sus propiedades de aislamiento térmico. Mientras que los ladrillos sin comprimir no cumplen con las normativas (ASTM C62-13, 2013).

Por otro lado, (Jaramillo-Pérez et al., 2014) utilizaron cal y desechos de extracción de yeso como materiales de estabilización para mejorar las propiedades de ladrillos de arcilla comprimida. Se prepararon 7 mezclas con diferentes proporciones, las cuales se basaron en los pesos secos de los ingredientes (0%, 2.5%, 5% y 10% de residuo de yeso), se le realizaron pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, absorción de agua, entre otros, después del proceso de curado de 28 días. Los ladrillos estabilizados mostraron mejores resultados que los no estabilizados

y el uso del 2.5 y 5% presentan mayor resistencia a la compresión, de igual manera, los estabilizados con cal mostraron una mejora significativa en condiciones extremadamente húmedas. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios en el criterio de los autores, lo que sugiere un trabajo experimental adicional para mejorar las propiedades de los ladrillos de tierra comprimida.

La arcilla es de los materiales más usados en la fabricación de ladrillos, y varios investigadores han estudiado el uso de diferentes tipos de arcilla. (Onana et al., 2019) evaluó los usos potenciales de materiales arcillosos aluviales de una comunidad de Camerún, recolectando muestras de 9 localidades diferentes (MBE, KAM, TAP, NGO, SAN, DOG1, TRY, DOG y WAN). De las muestras recolectadas (50 kg aproximadamente), se trituraron y tamizaron sobre un tamiz de 250  $\mu\text{m}$ , se analizaron 50 g de cada una de ellas. Para cada muestra se elaboraron cuatro ladrillos, para cada ladrillo, una mezcla de 100 g de arcilla asociada con 17-20% de agua (en seco). Los ladrillos de prueba se secaron para eliminar la humedad y luego se cocieron en un horno de mufla, a cinco temperaturas diferentes: 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C y 1100 °C. Para todos los ciclos de cocción, la velocidad de calentamiento fue de 5 °C/min y se adoptó un tiempo de cocción de 2 horas a la temperatura requerida antes de enfriar el horno a temperatura ambiente. Posterior a esto, se evaluó la resistencia a la flexión de acuerdo con la norma (ASTM F417-1996, 1996) y absorción de agua con la (ASTM C20-00, 2000), que demostraron que las arcillas eran ricas en caolita, cuarzo, mullita, feldespato y goetita. A excepción de la arcilla TRY, los valores de resistencia a la flexión de los productos cocidos fueron superiores a 2 MPa en todas las temperaturas de cocción y la gran formación de fase de mullita en el producto cocido con SAN justificó su mayor resistencia a la flexión. Finalmente se determinó que todas las arcillas estudiadas pueden ser usadas para elaborar ladrillos estructurales.

Otros autores buscaron mejorar las propiedades de los ladrillos de arcilla adicionando otro tipo de mineral como lo hicieron algunos investigadores (Menezes et al., 2010), quienes estudiaron el aserrín de piedra caliza laminada como material alternativo para la producción de bloques de arcilla roja (que consiste en caolinita, cuarzo y mica). Las proporciones de residuos añadidos a la arcilla roja fueron 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. Dichas muestras se quemaron a 900 °C, 950 °C y 1000 °C. Después de quemadas las muestras, se realizaron pruebas químicas y mineralógicas, por difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, distribución del tamaño de partícula y análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido para determinar sus propiedades, se puede concluir que en general, la absorción de agua de las muestras que contienen residuos aumenta y el módulo de ruptura disminuye con el aumento de la cantidad de residuos, independientemente de la temperatura de combustión; y que es posible incorporar hasta un 10% de residuos en formulaciones para la producción de ladrillo.

De manera similar, otros (Lawanwadeekul et al., 2020) buscaron mejorar las propiedades de la arcilla en ladrillos de arcilla cocida termo acústica, usando el carbón vegetal como material alternativo debido a la facilidad con que se puede reducir su tamaño de partícula. Las muestras de polvo de carbón vegetal obtenidas se añadieron a los ladrillos de arcilla en varias proporciones (0%, 5%, 15% o 30% en peso). Luego, la arcilla y el aditivo se mezclaron con agua en una proporción de aproximadamente 20-30%. Después de eso, se formaron muestras de ladrillos por extrusión con diferentes formas y dimensiones para medir varias propiedades con el equipo de prueba apropiado. Los especímenes fueron cocidos a tres diferentes temperaturas (900 °C, 1000 °C y 1100°C) en un horno eléctrico por 2 h y luego se dejó enfriar naturalmente a temperatura ambiente en el horno. Para determinar las propiedades, se desarrollaron pruebas físicas, mecánicas,

químicas y mineralógicas, y los resultados determinaron que utilizar un 15% en peso de carbón vegetal y una cocción a 1100 °C, es una alternativa viable en la elaboración de ladrillos de arcilla.

En otro estudio (Luo et al., 2020) utilizaron ganga de carbón y relaves de mineral de hierro para elaborar ladrillos sinterizados con lodo y lutitas residuales como aglutinante; las cantidades se mezclaron en diferentes proporciones de peso y se homogenizaron agregando 10% de agua. Posteriormente las mezclas se curaron a 20 °C por 8 h, después, se suprimieron en un molde y se secaron y cocinaron a temperaturas entre 950 °C y 1150 °C, finalmente se dejaron enfriar a temperatura ambiente para proceder con ensayos de absorción de agua, resistencia a la compresión y densidad aparente, para determinar así sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y mineralógicas. Se encontró que las condiciones óptimas, de acuerdo a la norma china (GB/T 2542-2012, 2012), son, relación de masa de relaves de mineral de hierro: polvo de ganga de carbón: lutita: lodo es 54:30:10:6, respetivamente, 20 MPa de presión de moldeo, una temperatura de 1100 °C de cocción durante 3 h. Por lo que se podría decir que los ladrillos preparados en este estudio tuvieron éxito.

Por otro lado, (Mimboe et al., 2020) se investigó la posibilidad de usar laterita calcinada como ligante y ácido fosfórico como estabilizante para fabricar ladrillos de tierra comprimida (CEB). La laterita se secó y se trituró con un molino de bolas para obtener un polvo que se tamizó por separado a 1 mm y a 200 µm, el polvo se calcinó a 700 °C durante 4 h a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. Se hicieron pruebas para determinar las proporciones y posteriormente la estabilización del suelo se llevó a cabo mediante la mezcla de laterita calcinada, solución de ácido fosfórico y agua. La mezcla se compactó en un molde de 220 mm de largo, 90 mm de ancho y 40 mm de alto, a una presión de 15 MPa durante 10 s. Los ladrillos obtenidos se secaron a temperatura ambiente por 7 días y adicionalmente se curaron a 65 °C por 48 h. Finalmente se

realizaron pruebas de resistencia a la compresión en húmedo y seco, y pruebas de absorción de agua para determinar la densidad aparente de los ladrillos. Los productos finales presentan buenos resultados en cuanto a las propiedades físico-mecánicas, lo cual indica la posibilidad de usar estos materiales en la construcción, sin embargo, se sugieren más investigaciones para optimizar las condiciones de síntesis para tener un producto con una buena relación precio/calidad.

Asimismo, (Bodian et al., 2018) se usó laterita mezclado con suelo arcilloso, este suelo presentó características de contracción al secarse y para reducir dicha contracción se le añade la laterita en diferentes cantidades (0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%). Para determinar el impacto de la adición de laterita, se realizaron pruebas mecánicas y térmicas, de acuerdo con la norma ([NF EN 12390-[NF EN 12393], 2003) con el objetivo de medir las propiedades termo físicas y mecánicas de ladrillos de arcilla no cocidos y cocidos. Las dimensiones de la muestra para la prueba mecánica fueron 16 cm de largo, 4 cm ancho y 4 cm de alto y las de la prueba térmica fueron 11 cm de largo, 11 cm de ancho y 3.3 cm de alto. Antes de cualquier prueba, la muestra se secó a 105 °C por 5 h y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Para las muestras de ladrillos cocidos se utilizó un horno eléctrico: las muestras secas se quemaron durante una hora y media a 900 °C. Los experimentos demuestran que, para su uso como material de construcción, el ladrillo de arcilla con un 30% de laterita es la mezcla adecuada tanto para ladrillos cocidos y no cocidos, cumpliendo la normativa ([NF EN 12390-[NF EN 12393], 2003).

Otros autores (Vakalova & Revva, 2020) investigaron el uso de rocas de zeolita para obtener ladrillos cerámicos. Se estableció la efectividad del aditivo de zeolita dependiendo de su dispersión, contenido y condiciones de temperatura. La adición de roca de zeolita (10–30% en peso) a la arcilla de ladrillo actúa como un extractor de humedad, reduciendo la sensibilidad de secado del índice en 3–4 veces sin afectar la cohesión de los materiales. Las materias primas

arcillosas utilizadas tienen la composición esmectita-ilita con mayor humedad (más de 22% - 24%), que debe reducirse al nivel de humedad de moldeo (18% - 19%). Las muestras de zeolita se prepararon en forma de baldosas de 50 mm de largo, 50 mm de ancho y 10 mm de alto y cubos de 25 mm de ancho y 25 mm de alto por método plástico a partir de una masa plástica con una humedad relativa de 20% - 22%. La humedad de la masa de zeolita se proporcionó añadiendo agua en la cantidad requerida. La preparación de la roca de zeolita para su uso como aditivo tecnológico en arcilla incluyó su secado a 200 °C - 250 °C para eliminar por completo el agua adsorbida y el "agua de zeolita". La preparación de la masa cerámica consistió en mezclar arcilla de ladrillo, con humedad natural (20%–25%–28%), con roca zeolítica seca de diversa finura en la cantidad de 10%–30%, con la adición de agua para obtener una masa cerámica con un contenido de humedad del 20%–22%, la masa cerámica se conservó a una temperatura de 30 °C durante al menos 24 h. Las muestras se secaron al aire, y después se quemaron en el rango de 950 °C-1150 °C con un intervalo de 50 °C y se mantuvieron a la temperatura final durante 2 h. La adición de roca de zeolita en una cantidad de 10%-30% a mezclas con arcilla altamente sensible al secado o arcilla con alta humedad natural actúa como extractor de humedad y aditivo no plástico. Las características de los procesos de formación de fases en mezclas de arcilla para ladrillos con roca zeolítica proporcionan la obtención de ladrillos cerámicos de construcción con una resistencia a la compresión de 20 MPa a 30 MPa a 1000 °C–1050 °C dependiendo del contenido del aditivo.

#### 4 Conclusiones

Este artículo presentó alternativas de uso de residuos industriales, orgánicos y de construcción, y aditivos minerales en la fabricación de ladrillos para obras civiles, con el fin de proteger el medio ambiente y disminuir la acumulación de estos desechos.

El reemplazo parcial de la arcilla por lodos industriales de cerámica, presentaron mejoras para la sostenibilidad ambiental, resistencia a la compresión y rendimiento térmico de los ladrillos de arcilla, obteniendo como resultado un aumento en la resistencia a la compresión del 32% y reducción de conductividad térmica hasta 31%.

La utilización de residuos orgánicos como las llantas y el plástico, mostraron resultados satisfactorios desde el punto de vista técnico, como reemplazo parcial de agregados finos en ladrillos de cemento hasta en un 20%, disminuyendo la resistencia a la compresión y aumentando la capacidad de absorción de agua.

Los residuos de construcción tuvieron aplicaciones prácticas como aditivos parciales en la elaboración de ladrillos, reemplazando la arcilla o el cemento hasta en un 70% en peso, los cuales proporcionaron ahorros de energía, mejoras en las propiedades acústicas y resistencia a la compresión.

En cuanto a la adición de minerales, el uso del 20% de bentonita en ladrillos de arcilla estabilizados con cal resulta útil, proporcionando mejoras en sus propiedades físico-mecánicas; mientras que el uso de cal y yeso como materiales estabilizantes en ladrillos de arcilla comprimida, mostraron resultados no satisfactorios en el criterio de los autores, sugiriendo trabajos experimentales adicionales.

Aunque la adición de los materiales alternativos, en su mayoría fueron causantes de una disminución de las propiedades físico-mecánicas en comparación con los ladrillos de control de cada una de las investigaciones, los valores se mantuvieron dentro de los rangos permisibles por las normas del país donde se realizó la investigación. Por consiguiente, se logró evidenciar la viabilidad de incorporar materiales alternativos, como reemplazo parcial y en algunos casos total, de los materiales tradicionales para la fabricación de ladrillos estructurales y no estructurales, lo que traduce en una solución en la disposición final de residuos.

### Referencias Bibliográficas

- [NF EN 12390-[NF EN 12393]. (2003). Essai pour béton durci- Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes. *ANFOR*.
- ABNT. (1967). *Associação Brasileira de Normas Técnicas; Norma Técnica, NBR 13818, Placas cerâmicas pararevestimento-especificação e métodos de ensaio*. 14–16.
- ABNT NBR 10836. (2013). *Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio*.
- ABNT NBR 7182:1986. (1986). *Solo - Ensaio de compactação*.
- Akasaki, J. ., & Silva, A. . (2001). Estudo de composições do solo estabilizado com cal e resíduos agroindustriais. *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA*, 30.
- Akinyele, J. O., Igba, U. T., & Adigun, B. G. (2020). Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks. *Scientific African*, 7, e00301. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00301>
- Amin, S. K., El-Sherbiny, S. A., El-Magd, A. A. M. A., Belal, A., & Abadir, M. F. (2017). Fabrication of geopolymers bricks using ceramic dust waste. *Construction and Building Materials*, 157, 610–620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052>
- Apithanyasai, S., Supakata, N., & Papong, S. (2020). The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. *Heliyon*, 6(3), e03697. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03697>
- AS/NZS 4456:2003. (2003). Masonry units, segmental pavers and flags - Methods of test. *Estándares Franceses*.
- ASTM C1006-07. (2007). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Masonry Units. *ASTM International, West Conshohocken*.

- ASTM C20-00. (2000). Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. *ASTM International, West Conshohocken.*
- ASTM C373-14a. (2014). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, Ceramic Tiles, and Glass Tiles. *ASTM International.*
- ASTM C62-04. (2004). Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made from Clay). *ASTM Book Standards.*
- ASTM C62-13. (2013). *Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).*
- ASTM C67-07. (2007). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.*
- ASTM C67-11. (2011). Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. American Society for Testing and Materials. *West Conshohocken, Pennsylvania.*
- ASTM C67-14. (2014). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. *West Conshohocken.*
- ASTM C67-19. (2019). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. *ASTM International, West Conshohocken.*
- ASTM C773-88. (2011). Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength of Fired Whiteware Materials. *ASTM International.*
- ASTM D1635-00. (2006). Standard test method for flexural strength of soilcement using simple beam with 3rd point loading. American Society for Testing and Materials. *West Conshohocken, Pennsylvania.*

- ASTM D2166-00e1. (2004). Standard Test method for unconfined compressive strength of cohesive soils. American Society for Testing and Materials. *West Conshohocken, Pennsylvania*.
- ASTM F417-1996. (1996). *Test Method for Flexural Strength (Modulus of Rupture) of Electronic-Grade Ceramics*.
- ASTM NBR 8492. (2012). *Tijolo maciço de solocimento- Determinação da resistência á compressão e da absorção de água*.
- Baghel, R., Pandel, U., & Vashista, A. (2019). Manufacturing of sustainable bricks: Utilization of mill scale and marble slurry. *Materials Today: Proceedings*, 26(xxxx), 2136–2139. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.460>
- Bio Service, I. (2011). Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste. *European Commission*.
- Bodian, S., Faye, M., Sene, N. A., Sambou, V., Limam, O., & Thiam, A. (2018). Thermo-mechanical behavior of unfired bricks and fired bricks made from a mixture of clay soil and laterite. *Journal of Building Engineering*, 18(October 2017), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.014>
- Cabrera, F., Gómez, J. ., Almaral, J., Arredondo, S., Gómez, M. ., & Mendivil, J. (2017). Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a. *Científica Ingeniería y Desarrollo*, 35.
- Chandra, S. (1977). Waste materials used in concrete manufacturing. *Noves Publications Westwood*.
- CONSTRUMÁTICA. (2018). *Ensayo de Envejecimiento Acelerado*. [https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo\\_de\\_Envejecimiento\\_Acelerado](https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_de_Envejecimiento_Acelerado)

- CSP. (2018). *¿Qué son residuos orgánicos?* 5 Cubitos. <http://www.cslapalma.org/5cubitos/que-son-los-residuos-organicos>
- Decreto 4741 de 2005. (2005). *Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.*
- dos Reis, G. S., Cazacliu, B. G., Cothenet, A., Poullain, P., Wilhelm, M., Sampaio, C. H., Lima, E. C., Ambros, W., & Torrenti, J. M. (2020). Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive. *Journal of Cleaner Production*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120733>
- El-Naggar, K. A. M., Amin, S. K., El-Sherbiny, S. A., & Abadir, M. F. (2019). Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials. *Construction and Building Materials*, 222, 699–705. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.182>
- Farnood Ahmadi, P., Ardeshir, A., Ramezani pour, A. M., & Bayat, H. (2018). Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 44(7), 7588–7598. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.175>
- Ferreira, R. D. C., Cunha, J. C. D. C. G., & N., A. H. (2018). Husk and their effects on physical and mechanical properties of soil-cement bricks. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 28(1), 1–11.
- Fiala, L., Konrád, P., Fořt, J., Keppert, M., & Černý, R. (2020). Application of ceramic waste in brick blocks with enhanced acoustic properties. *Journal of Cleaner Production*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121185>
- Figueiredo, S. S., & Silva, C. G. (2011). *Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil.* 64(3), 273–279.
- Fuentes, N., Isenia, S., & Ascencio, J. (2018). *Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámica.*

Gaggino, R. (2008). Plastic Bricks and Panels for Seldconstruction. *Revista INVI*, 23, 137–163.

<http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/446/955>

GB/T 2542-2012. (2012). *Test methods for wall bricks*.

GB/T 25993-2010. (2010). *Permeable paving bricks and permeable paving flags*.

GB/T28635-2012. (2012). *Pavimentos de hormigón prefabricado*.

GB 5085.3-2007. (2007). *Identification standards for hazardous wastes. Identification for extraction toxicity*.

GB 5101-2003. (2003). *Fired common bricks*.

Gencil, O., Erdugmus, E., Sutcu, M., & Oren, O. H. (2020). Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks. *Construction and Building Materials*, 255, 119362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>

Giffoni, P. de O., & Lange, L. C. (2005). A utilização de borra de fosfato como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 10(2), 128–136. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522005000200006>

Gil, I. (2018). *LADRILLOS*. <https://www.rocasym minerales.net/ladrillo/>

Greenpeace. (2015). *Datos sobre la producción de plásticos*. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>

Hamad, M. A., & Jhattab, L. A. (1981). *Thermochem. Acta* 48. 3, 343.

Herek, L. C. S., Silva Junior, A. T., Pavezzi, C. C., Bergamasco, R., & Tavares, C. R. G. (2009). Incorporação de lodo de lavanderia industrial na fabricação de tijolos cerâmicos. *Cerâmica*, 55(335), 326–331. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132009000300013>

ICONTEC. (2005). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Norma Técnica*

*Colombiana – NTC 4017. Métodos Para Muestreo y Ensayos de Unidades de Mampostería y Otros Productos de Arcilla.*

INSO 7-2016. (2016). *Iranian National Standardization Organization, Clay brick- Specifications and Test Methods.*

IRAM. (2003). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *Construcción.*

IS 2185-1. (2005). *Concrete masonry units, Part 1: Hollow and solid concrete blocks.*

IS1077:1992. (1992). Common burnt clay building bricks specification. *Bureau of Indian Standards, New Delhi.*

IS1905:1987. (1987). *Indian standard code of practise for structural use of unreinforced masonry.*

IS3495:1992. (1992). Indian standard methods of tests of burnt clay building bricks. *Bureau of Indian Standards, New Delhi.*

ISO10545-3. (2004). *Ceramic tiles- determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. 2.*

ISO10545-4. (2004). *Ceramic tiles - determination of modulus of rupture and breaking strength. 2.*

IWRG631. (2009). *Industrial waste resource guidelines.*

Jaramillo-Pérez, E. R., Plata-Chaves, J. M., & Ríos-Reyes, C. A. (2014). The use of gypsum mining by-product and lime on the engineering properties of compressed earth blocks [El uso de residuos de minería de yeso y cal sobre las propiedades de ingeniería de los bloques de tierra comprimida]. *DYNA (Colombia)*, 81(188), 42–51.

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

84918559938&doi=10.15446%2Fdyna.v81n188.39725&partnerID=40&md5=75c32bdebaf4731b1497ac1146d873eb

- Javed, U., Khushnood, R. A., Memon, S. A., Jalal, F. E., & Zafar, M. S. (2020). Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469>
- Jordan, R. A., Da Costa, M. V., Martins, E. A. S., Rosa, M. A., & Petruski, A. (2019). Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash. *Engenharia Agricola*, 39(1), 26–31. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p26-31/2019>
- LaVerdad. (2018). *Más de 2 millones de neumáticos se desechan cada año*. <https://laverdadnoticias.com/ecologia/Mas-de-2-millones-de-neumaticos-se-desechan-cada-ano.-20180605-0041.html>
- Lawanwadeekul, S., Otsuru, T., Tomiku, R., & Nishiguchi, H. (2020). Thermal-acoustic clay brick production with added charcoal for use in Thailand. *Construction and Building Materials*, 255, 119376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119376>
- Li, R., Zhou, Y., Li, C., Li, S., & Huang, Z. (2019). Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 213, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>
- Luna-Cañas, L. M., Ríos-Reyes, C. A., Quintero-Ortíz, L. A., Maritza, L., Alberto, C., Amparo, L., Luna-Cañas, L. M., Ríos-Reyes, C. A., & Quintero-Ortíz, L. A. (2014). Recycling of agroindustrial solid wastes as additives in brick manufacturing for development of sustainable construction materials [Reciclaje de residuos sólidos agroindustriales como aditivos en la fabricación de ladrillos para el desarrollo sostenible d. *DYNA (Colombia)*, 81(188), 34–41. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84918502383&doi=10.15446%2Fdyna.v81n188.39717&partnerID=40&md5=52d0b9402c4134660b98f5d305206480>

- Luo, L., Li, K., Weng, F., Liu, C., & Yang, S. (2020). Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, 232, 117250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117250>
- Maza-Ignacio, O. T., Jiménez-Quero, V. G., Guerrero-Paz, J., & Montes-García, P. (2020). Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks. *Construction and Building Materials*, 234, 117314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117314>
- Medeiros, E. N. M. de, Sposto, R. M., Neves, G. de A., & Menezes, R. R. (2010). Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento. *Cerâmica*, 56(340), 399–404. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132010000400014>
- Menezes, R. R., Melo, L. R. L., Fonsêca, F. A. S., Souto, P. M., Neves, G. de A., & Santana, L. N. L. (2010). Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos. *Rem: Revista Escola de Minas*, 63(4), 667–672. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672010000400011>
- Milak, P., Souza, M. T., Bom, C. P., Mantas, P., Raupp-Pereira, F., & De Oliveira, A. P. N. (2017). Valorization of rice husk ash in ceramic bricks. *Cerâmica*, 63(368), 490–493. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682137>
- Mimboe, A. G., Abo, M. T., Djobo, J. N. Y., Tome, S., Kaze, R. C., & Deutou, J. G. N. (2020). Lateritic soil based-compressed earth bricks stabilized with phosphate binder. *Journal of Building Engineering*, 31(April), 101465. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101465>
- Miranda, L. de A., Alvarenga, R. de C. S. S. A., Pinto, P. C. M., de Paula, E. D., de Carvalho, C.

- A. B., Fassoni, D. P., & Couto, L. G. (2011). Avaliação do Potencial do Grits Como Material de Construção na Produção de Tijolos de Solo-Cimento. *Revista Arvore*, 35(6), 1335–1340. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000700020>
- Mohajerani, A., & Karabatak, B. (2020). Microplastics and pollutants in biosolids have contaminated agricultural soils: An analytical study and a proposal to cease the use of biosolids in farmlands and utilise them in sustainable bricks. *Waste Management*, 107, 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.021>
- Mohammed, B. S., Liew, M. S., S Alaloul, W., Al-Fakih, A., Ibrahim, W., & Adamu, M. (2018). Development of rubberized geopolymer interlocking bricks. *Case Studies in Construction Materials*, 8(January), 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.007>
- NBR 7171:1. (1992). *Permeable paving bricks and permeable paving flags. Bloco cerâmico para alvenaria.*
- NCh 181 Of. 67. (1967). *Norma Chilena Oficial, Bloques huecos de hormigón de cemento.* 1–5.
- NTC 4205-2004. (2004). *Industrial waste resource guidelines.*
- Onana, V. L., Ntoulala, R. F. D., Mbey, J. A., Ngo’O Ze, A., Kabeyene, V. K., & Ekodeck, G. E. (2019). Mineralogy and preliminary assessment of the potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). *Ceramica*, 65(375), 407–415. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752626>
- Ottosen, L. M., Bertelsen, I. M. G., Jensen, P. E., & Kirkelund, G. M. (2020). Sewage sludge ash as resource for phosphorous and material for clay brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 249, 118684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118684>
- Peng, Y., Peng, X., Yang, M., Shi, H., Wang, W., Tang, X., & Wu, Y. (2020). The performances of the baking-free bricks of non-sintered wrap-shell lightweight aggregates from dredged

- sediments. *Construction and Building Materials*, 238, 117587.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117587>
- Pérez, M. T., Baeza, F., Garcés, P., Galao, O., & Payá, J. (2013). USO POTENCIAL DE CENIZA DE LODO DE DEPURADORA COMO SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO FINO EN BLOQUES DE HORMIGÓN PREFABRICADOS. *Dyna*, 80, 140–150.
- Phonphuak, N., Saengthong, C., & Srisuwan, A. (2019). Physical and mechanical properties of fired clay bricks with rice husk waste addition as construction materials. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1668–1674. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.197>
- Pineda, J. (2020). *El problema ambiental de la basura*. <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/problema-ambiental-basura/>
- Pokhara, P., Ekamparam, A. S. S., Gupta, A. B., Rai, D. C., & Singh, A. (2019). Activated alumina sludge as partial substitute for fine aggregates in brick making. *Construction and Building Materials*, 221, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.002>
- Roa Bohórquez, K. L., Paredes Roa, R. A., & Lara González, L. Á. (2018). Aplicación de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 35–49.  
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a2>
- RSU, C. P. (2019). *RESIDUOS ORGÁNICOS*.  
<http://www.consorciorsumalaga.com/5936/residuos-organicos>
- Sánchez Silva, M., & Zapata Valencia, L. A. (2013). Impacto ambiental y gestión del riesgo de ladrilleras en la vereda Los Gómez de Itagüí. *Cuaderno Activa*, 5, 109–123.
- Santacruz Torres, J., & Torres Agredo, J. (2019). Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1), 7–

18. <https://doi.org/10.18359/rcin.3495>

Silkeblock. (2017). *HISTORIA DEL BLOQUE DE HORMIGÓN*. Premoldeados de Hormigón.

<http://silkeblock.com/historia-del-bloque-de-hormigon/>

Silva, T. D., de Paula, H. M., Da Silva, D., Carvalho, I. M., Fonte, J. T., & Pereira, R. R. (2017).

Uso De Granulado De Borracha Em Substituição Parcial Ao Agregado Miúdo Na Produção De Tijolos Ecológicos. *Revista Materia*, 22(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0239>

Slimanou, H., Eliche-Quesada, D., Kherbache, S., Bouzidi, N., & Tahakourt, A. /K. (2020). Harbor

Dredged Sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties. *Journal of Building Engineering*, 28(November 2019), 101085.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101085>

Subashi De Silva, G. H. M. J., & Hansamali, E. (2019). Eco-friendly fired clay bricks incorporated

with porcelain ceramic sludge. *Construction and Building Materials*, 228, 116754.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116754>

Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019).

Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233, 753–764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>

Thakur, A., Senthil, K., Sharma, R., & Singh, A. P. (2020). Employment of crumb rubber tyre in

concrete masonry bricks. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.106>

TS EN 771-1. (2005). *Specification for masonry units-Part 1: Clay masonry units*.

UAESP. (2010). Informe Censo de Molineros. *Bogotá*.

UNE. (2011). *EN 771-3 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Bloques de*

*hormigón (árido, densos y ligeros).*

- Vakalova, T. V., & Revva, I. B. (2020). Use of zeolite rocks for ceramic bricks based on brick clays and clay loams with high drying sensitivity. *Construction and Building Materials*, 255, 119324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119324>
- Valdés, G. A., & Rapimán, J. G. (2007). Propiedades físicas y mecánicas de bloques de hormigón compuestos con áridos reciclados. *Informacion Tecnologica*, 18(3), 81–88. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642007000300010>
- Vélez, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción Más Limpia*, 2, 57–71.
- Wang, Y., Gao, S., Liu, X., Tang, B., Mukiza, E., & Zhang, N. (2019). Preparation of non-sintered permeable bricks using electrolytic manganese residue: Environmental and NH<sub>3</sub>-N recovery benefits. *Journal of Hazardous Materials*, 378(December 2018), 120768. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120768>
- Yaras, A. (2020). Combined effects of paper mill sludge and carbonation sludge on characteristics of fired clay bricks. *Construction and Building Materials*, 249, 118722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118722>
- Zabaleta, H. (1996). *Compendio de tecnología del hormigón (2°)*. Publicaciones Instituto Chileno del Hormigón.
- Zhang, M., Chen, C., Mao, L., & Wu, Q. (2018). Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. *Construction and Building Materials*, 159, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.130>
- Zhou, C. (2018). Production of eco-friendly permeable brick from debris. *Construction and Building Materials*, 188, 850–859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.049>