

**LA ESCORIA SIDERÚRGICA DE ALTO HORNO COMO ALTERNATIVA
ECOLÓGICA EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN: REVISIÓN
BLAST FURNACE SLAG AS AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY
ALTERNATIVE IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION AND BUILDING
MATERIALS: A REVIEW**

Eduard Malagón¹, Camilo Ramos¹, Mónica A. Villaquirán-Caicedo²

¹Estudiante Ingeniería de Materiales, Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali, Colombia.

²Docente Escuela Ingeniería de Materiales, Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali, Colombia.

Resumen

Actualmente, la tendencia mundial está orientada a cerrar los ciclos productivos, con el fin de minimizar el volumen de residuos que van a parar a depósitos y vertederos y con ello disminuir el impacto ambiental en todos los ámbitos. El uso de subproductos industriales en el sector productivo es una alternativa ecológica que promueve la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, debido a un menor consumo de materias primas de origen natural para la fabricación de diferentes materiales. Entre los diferentes residuos generados en los procesos productivos, está la escoria siderúrgica de alto horno (GBFS). Este residuo generado durante la manufactura de acero ha venido siendo aprovechado en los últimos años para la producción de diversos tipos de materiales, entre ellos los materiales de construcción. Entre sus diferentes usos se destaca su empleo en la fabricación de cementos, concretos, tejas, ladrillos, estabilización de suelos, vitrocerámicas, entre otros. Esta revisión se realizó con artículos desde el año 2010 hasta enero de 2021, con el fin de generar un documento donde se puedan identificar claramente las principales características y propiedades de los materiales producidos con GBFS e incorporaciones pequeñas de residuo de cenizas de carbón. Se encontró que el uso de GBFS y cenizas ofrecieron los componentes químicos necesarios como CaO , SiO_2 y Al_2O_3 para permitir la aparición de las fases cristalinas necesarias para el desarrollo apropiado de las propiedades típicas en los materiales cerámicos producidos.

Palabras clave: residuos industriales; escoria siderúrgica; vitrocerámicas; cemento; suelos.

Abstract

Currently, the global trend is aimed to closing production cycles, in order to minimize the volume of waste that goes to deposits and landfills and thereby reduce the environmental impact in all areas. The implementation of industrial by-products in the manufacturing sector is an ecological alternative which promotes the reduction of carbon dioxide emissions to the

atmosphere, due to a low consumption of natural raw materials for the manufacture of different materials. Among the different wastes generated in production processes the ground granulated blast furnace slag (GBFS) is one of the most used. This waste is generated during the manufacture of steel has been used in recent years for the production of various types of materials, including ceramics. It has different uses including its utilization in the manufacture of cements, concretes, tiles, bricks, soil stabilization, glass-ceramics, among others. This review was carried out with articles from 2010 to January 2021, in order to generate a document where the main characteristics and properties of ceramic materials produced with GBFS and small incorporations of fly ash waste can be clearly identified. It was found that the use of GBFS and fly ash offered the necessary chemical components such as CaO, SiO₂ and Al₂O₃ to allow the formation of the crystalline phases necessary for the adequate development of the typical properties of the ceramic materials produced.

Keywords: industrial wastes; GBFS, glass-ceramic; cements; soils.

Contenido	# pág.
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	6
3.1 OBTENCIÓN DE VITROCERÁMICAS: TIPOS Y MÉTODOS DE OBTENCIÓN	6
3.2 VITROCERÁMICAS OBTENIDAS A PARTIR DE GBFS.....	8
3.2.1 <i>Vitrocerámicas espumadas a partir de GBFS y vidrio reciclado.....</i>	<i>10</i>
3.2.2 <i>Vitrocerámicas con GBFS y ceniza volante obtenidas a partir de activación alcalina leve.</i>	<i>11</i>
3.3 USO DE GBFS PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES AGLOMERANTES.	12
3.4 USO DE GBFS EN LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA	15
3.5 FABRICACIÓN DE PAREDES DE TIERRA APISONADA	16
3.6 OBTENCIÓN DE VIDRIOS CON GBFS.....	17
3.7 BALDOSAS CON ESCORIAS	18
4. CONCLUSIONES.....	19
5. REFERENCIAS.....	20

1. Introducción

La valoración y aprovechamiento de residuos y subproductos industriales hoy día se presenta como una solución para la disminución de la huella de carbono y mitigación de los impactos ambientales en la producción industrial. No obstante, crear una economía circular a partir de estos subproductos no es una tarea sencilla, debido a que culturalmente se tiene la concepción de que los productos realizados con materia prima alternativa no resultan capaces de soportar los mismos

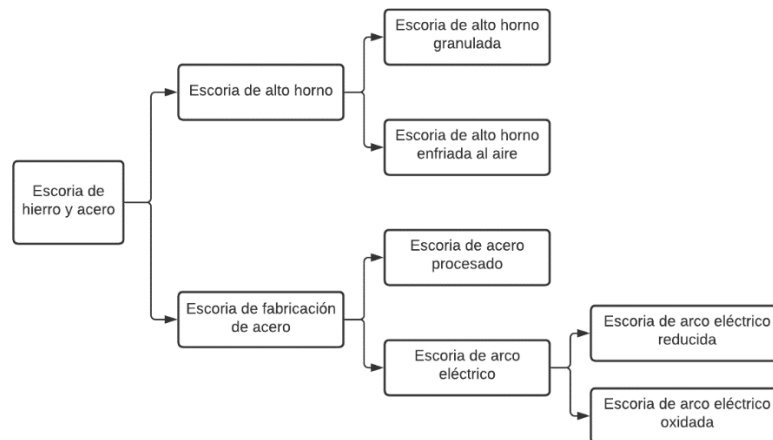
usos a los fabricados con materia prima virgen. Sumado a esto en algunos casos, la falta de investigaciones y normas técnicas a la hora de utilizar residuos hace que ciertos procesos de aprovechamiento sean industrialmente poco viables con las tecnologías actuales.

Por otro lado, existe la necesidad de reducir las emisiones de gases que se consideran aportan a la generación de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel industrial. En el sector cementero se ha identificado que el cemento Portland (OPC) deja una huella de carbono importante, ya que su producción demanda gran cantidad de energía y emite CO₂ durante su procesamiento (Mohammadinia et al., 2016)(Parihar & Verma, 2020). Con el objetivo de disminuir las emisiones, se ha propuesto la sustitución parcial del OPC con otros materiales cementantes y/o puzolanas. Un ejemplo de materiales complementarios es la escoria de alto horno o escoria siderúrgica (ver Figura 2) obtenida como subproducto en la fabricación de acero crudo (arrabio), este material se forma por las reacciones químicas que se generan en el horno entre la materia prima principal (minerales de hierro) y otras sustancias añadidas proceso como carbón coque y fundentes. La composición química de la escoria estará determinada por la materia prima utilizada (ver Figura 1) y su morfología por la manera de enfriamiento una vez salga del alto horno; de manera general la sumatoria de los contenidos de SiO₂, Al₂O₃ y CaO se encuentran entre el 87% - 96%, encontrándose el CaO de aproximadamente en un 40%, por lo cual es considerada como material de tipo puzolánico (Angulo-Ramírez et al., 2017)(Valderrama et al., 2019). Otro de los materiales utilizados como puzolana en el sector cementero es la ceniza volante, la cual es generada por la quema de carbón coque en las calderas industriales o termoeléctricas, el material inorgánico que se genera posterior a la quema es recuperado en filtros electrostáticos debido a su tamaño fino de partícula (Majhi & Nayak, 2020).

FRX Escoria de Alto Horno								
Compuesto y/o Elemento	CaO	SiO₂	Al₂O₃	SO₃	MgO	Fe₂O₃	TiO₂	K₂O
% Peso	42,05	32,96	12,48	3,32	3,14	0,60	0,49	0,44

Figura 1. Composición química de la escoria de alto horno.

Fuente: Resultados propios.



*Figura 2. Tipos de escorias de hierro y acero.
Fuente: Modificado de (Lee et al., 2019).*

En este documento de revisión los artículos seleccionados abarcaron el uso de la escoria de Alto Horno como adición parcial o total gracias al aporte de los componentes químicos necesarios para permitir la aparición de las diferentes fases cristalinas, las cuales, son identificables a través de diferentes métodos como la termogravimetría, difracción de rayos X y microscopía electrónica. Adicionalmente, los artículos estudiados contenían la fabricación de diferentes materiales de construcción, tales como ladrillos, paredes de adobe, concretos, baldosas y cementos geopoliméricos, y se les realizaron diferentes ensayos mecánicos con el fin de determinar la viabilidad para ser usados en situaciones reales. Finalmente, la revisión de los artículos tuvo en cuenta los estudios que concluyeron en materiales de construcción utilizables y donde su desarrollo siempre incluyera a la escoria de alto horno de forma parcial o total.

Este documento de revisión tiene como enfoque el aprovechamiento de la escoria de Alto Horno y se incluyeron investigaciones donde esta era adicionada de manera parcial o total en la producción de materiales de construcción tales como ladrillos, paredes de adobe, concretos, baldosas y cementos geopoliméricos, presentándose como una alternativa ecológica para el medio ambiente. Para esto se tuvieron en cuenta las investigaciones realizadas a partir del 2016 y se descartaron aquellos trabajos donde la escoria de Alto Horno no era una adicción principal.

2. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA

Este estudio ofrece una revisión bibliográfica con artículos publicados desde el año 2010 hasta enero de 2021, donde la reducción en la huella de carbono y formulaciones eco-amigables fueron estudiadas a partir del uso de la escoria de alto horno en la fabricación de materiales de construcción. Se comparó y analizó el efecto de la incorporación de los diferentes subproductos en las propiedades generadas al compararse con materiales producidos con materias primas

naturales. Las palabras claves utilizadas para la búsqueda de artículos fueron “slag”, “blast furnace”, “ecofriendly”, “sustainable”, “materials engineering”. La ecuación de búsqueda utilizada para la revisión en la base de datos Scopus fue la siguiente:

Your query: (TITLE-ABS-KEY (slag) AND TITLE-ABS-KEY (blast AND furnace) AND TITLE-ABS-KEY (uses OR alternatives) AND TITLE-ABS-KEY (materials OR engineering) AND TITLE-ABS-KEY (ecofriendly OR sustainable)) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 2010

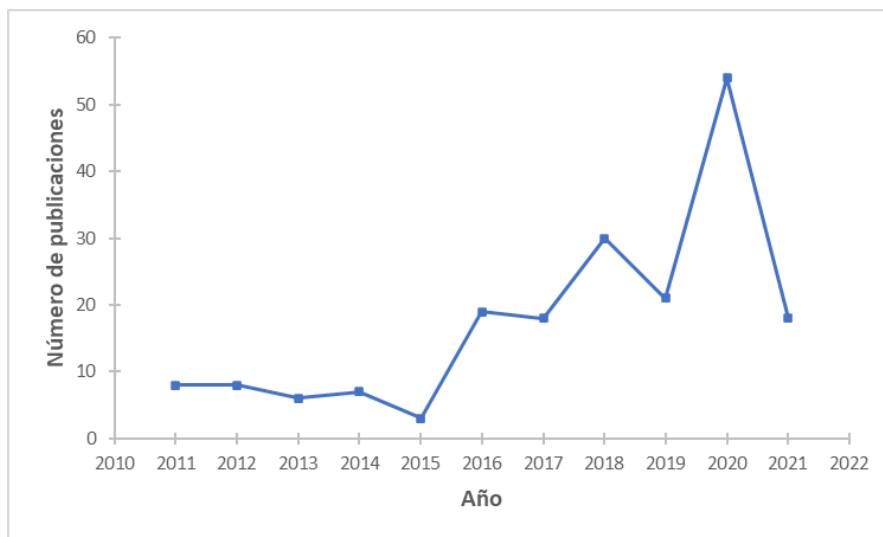


Figura 3. Numero de publicaciones sobre escoria de alto horno como alternativa eco-amigable
Fuente: Datos extraídos de la base de datos SCOPUS (2021)

La Figura 3 muestra que a partir del 2016 el interés de utilizar la GBFS como alternativa eco-amigable con el fin de reducir los GEI al darse un aprovechamiento a un subproducto, ha tenido un crecimiento relevante; y en el 2020 se aprecia el interés de esta alternativa ya conocida, pero con un enfoque hacia la optimización ambiental. Las publicaciones encontradas mediante la ecuación de búsqueda en la base de datos SCOPUS, mencionaban la escoria de alto horno, sin embargo, este estudio se enfocó en los artículos que contenían aplicaciones en materiales de construcción tales como ladrillos, concretos, baldosas cerámicas, geopolímeros y vitrocerámicas.

Como se puede observar en la Figura 4 el continente asiático encabeza las investigaciones y publicaciones referente al uso de GBFS como material eco-amigable comparado al resto de continentes. Es importante destacar que en el continente americano hay poco desarrollo y publicaciones al respecto del tema, sin embargo, se presentan publicaciones de países como Canadá, Brasil y Colombia.

Distribución de publicaciones por continente

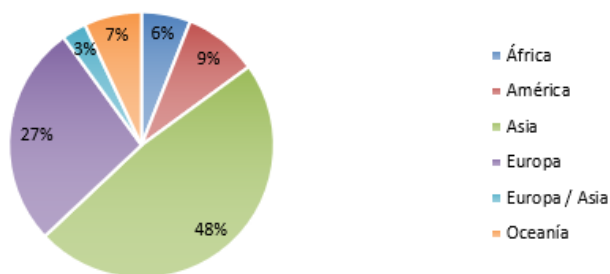


Figura 4. Porcentaje de publicaciones por continente.
Fuente: Datos extraídos de la base de datos Scopus (2021).

3. Resultados y Análisis

Dentro de las aplicaciones de la GBFS se encontró que es mezclada con otros residuos para la fabricación de materiales de construcción como vitrocerámicos, cementos, concretos, geopolímeros y vidrio. A continuación, se describen las principales características y propiedades de los materiales de construcción que incluyen en sus formulaciones GBFS y otros residuos.

3.1 Obtención de vitrocerámicas: tipos y métodos de obtención

Las vitrocerámicas son sólidos policristalinos donde se ha controlado la cristalización de sus fases. Esto se alcanza a través de un estricto control de los tratamientos térmicos donde se modifican las variables de temperatura y tiempo, con el fin de inducir la cristalización. Debido a que en una vitrocerámica hay una fase vítrea y una cristalina, se requieren que el tratamiento térmico sea en dos etapas. Una temperatura baja para favorecer la nucleación y una temperatura alta para favorecer la cristalización (Francis et al., 2002). A través del tiempo se han podido desarrollar diferentes tipos de vitrocerámicas, siendo las MAS ($\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), CAS ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) y LAS ($\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), las más comúnmente obtenidas.

3.1.1.1 Vitrocerámicas MAS

Son usadas en la fabricación de vitrocerámicas para aplicaciones a alta temperatura. Las vitrocerámicas MAS son conocidas por su alta resistencia mecánica, y son usadas en las composiciones de los vitrocerámicos para producir tarjetas de circuitos, convertidores catalíticos, filtros, superficies de hornos y materiales aislantes térmicos. La fase cristalina cordierita, es obtenida a partir del control de agentes nucleantes y de tratamientos térmicos que influyen las fases cristalinas formadas. (Başaran et al., 2016). Las ventajas de este material vitrocerámico en la construcción es que presenta mejores propiedades mecánicas y de resistencia a la abrasión que el gres porcelánico y que puede ser moldeado en caliente en función de su lugar de colocación, debido a la existencia de un alto porcentaje de vidrio residual. (Albert et al., 2015).

3.1.1.2 Vitrocerámicas CAS

Son obtenidas principalmente a partir de mezcla de residuos ricos en Al_2O_3 y SiO_2 como cenizas volantes con GBFS. Los vidrios de partida para la obtención de estas vitrocerámicas, es sabido que tienen una buena tendencia a la cristalización y formación de fases cristalinas como wollastonita acicular, anortita, albita, akermanita y espinelas de hierro que crecen en la superficie. Para que el proceso sea factible (relativo bajo costo) las cenizas volantes mezclan con vidrio reciclado, dolomitas y algunos residuos agroindustriales haciendo el proceso más viable (Albert et al., 2015)(Ozabaci et al., 2016)(Dávalos et al., 2020)(Montoya-Quesada et al., 2020).

3.1.1.3 Vitrocerámicas LAS

Son obtenidas a partir de silicatos con Li_2O , el cual favorece la cristalización y proporciona buenas propiedades eléctricas y mecánicas. Cuando se adiciona TiO_2 o P_2O_5 como catalizadores en la nucleación se obtienen materiales de muy bajo coeficiente de dilatación térmica (Rincón & Romero, 1996).

Métodos de obtención

Las vitrocerámicas son obtenidas a través de diferentes métodos como (i) el método convencional, que consiste en desvitrificar un vidrio en dos etapas, controlando las temperaturas de nucleación y de cristalización, (ii) a partir de sinterización y cristalización de polvos vítreos. (iii) En el método petrúrgico, se controla el enfriamiento a partir de la temperatura de fusión de forma muy lenta, con esto se logra controlar la nucleación y el crecimiento de las fases cristalinas. No obstante, estos procesos son generalmente costosos por involucrar altos consumos de energía utilizada en fundir a temperaturas entre $1400\text{ }^\circ\text{C}$ a $1650\text{ }^\circ\text{C}$, y de la misma forma influye en su costo de producción los tratamientos térmicos posteriores al fundido donde se logran una nucleación controlada y una cristalización inducida (Francis et al., 2002)(Albert et al., 2015).

Es posible encontrar nuevas alternativas para la consecución de las vitrocerámicas, tal como es el caso del *proceso hidrotermal modificado*, el cual consiste en aplicar una activación alcalina débil a suspensiones acuosas de GBFS utilizando NaOH como activador alcalino y posteriormente someter la muestra obtenida en una autoclave para lograr presiones y temperaturas elevadas (Romero et al., 2019). Este proceso fue utilizado por primera vez por el geólogo británico Sir Roderick Murchison con el objeto de lograr explicar el fenómeno que causaba el agua a altas temperaturas y presiones provocando cambios en la corteza terrestre como es la formación de rocas y minerales, por tal motivo el origen del término hidrotermal es geológico (Byrapa & Yoshimura, 2001). No obstante en la década de los 40's, los científicos de materiales popularizaron esta técnica en la obtención de cristales de cuarzo utilizando un digestor de vapor para lograr las elevadas temperaturas y presiones (Byrapa & Yoshimura, 2001).

Desde el punto de vista ambiental, la obtención de vitrocerámicas es ideal para reutilizar residuos inorgánicos incluyendo los de carácter tóxicos como es el caso de la escoria de alto horno enfriada en aire, o por sus siglas en ingles GBFS (Başaran et al., 2016)(Rondón et al., 2018).

3.2 Vitrocerámicas obtenidas a partir de GBFS

En Colombia, la empresa Acerías Paz del Río es la única industria que genera este subproducto con una producción estimada en 180.000 ton/mes y actualmente se suministra en su totalidad a las industrias cementeras (Nobsa – Boyacá – Colombia, 2019).

(Liu et al., 2009) lograron sintetizar vitrocerámicas mediante el proceso convencional de sinterización de polvos, usando como materia prima GBFS de la compañía “*Anyang Iron Corporation*” de China. Los polvos de GBFS con tamaños de entre 10 y 20 μm , fueron mezclados con feldespatos potásicos como aditivo en proporciones de 5%, 8% y 10% en peso. Las mezclas en polvos obtenidas después de dos horas en el molino de bolas fueron dimensionadas con moldes metálicos y prensados a temperatura ambiente, sin ningún aglutinante con presiones de 40 y 60 MPa.; finalmente, obtuvieron muestras en verde listas para el proceso de sinterización y cristalización. En el proceso de sinterización y cristalización las muestras fueron sometidas a una temperatura de 720°C – 760°C y 800°C – 900°C respectivamente con velocidades de calentamiento de 2-5 °C/min; posterior a estos procesos, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico a 1200°C. Las muestras fueron sometidas al ensayo de calorimetría de barrido (DSC) donde se identificó que el pico endotérmico estuvo entre 737°C-741°C en donde las muestras en estas temperaturas hubo un reordenamiento molecular; el pico exotérmico se dio entre 800°C-900°C y en este rango se obtiene la cristalización del vidrio (Figura 5). El resultado mostró que con las tres mezclas fue posible obtener vitrocerámicas, sin embargo, la que contaba con un 5% en peso de feldespato potásico resaltó entre las otras, ya que esta se pudo desvitrificar con éxito durante el tratamiento térmico, es decir que la adición actuó como agente fundente durante el proceso de sinterización, lo que redujo la temperatura de sinterización y redujo la viscosidad del vidrio; con mayor porcentaje de feldespato potásico la viscosidad aumentó y la cristalización fue más difícil (Liu et al., 2009). La superficie de las vitrocerámicas fue lisa y con altas porosidades (ver Figura 6). La fase cristalina principal que se encontró en la muestra con 5% de aditivo fue Gelenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) con Akermanita delgada ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), responsables de una micro dureza de 5.2 GPa, resistencia mecánica a la flexión de 85 MPa y una buena resistencia al desgaste, así como también resistencia a química cercana al 100% (Liu et al., 2009).

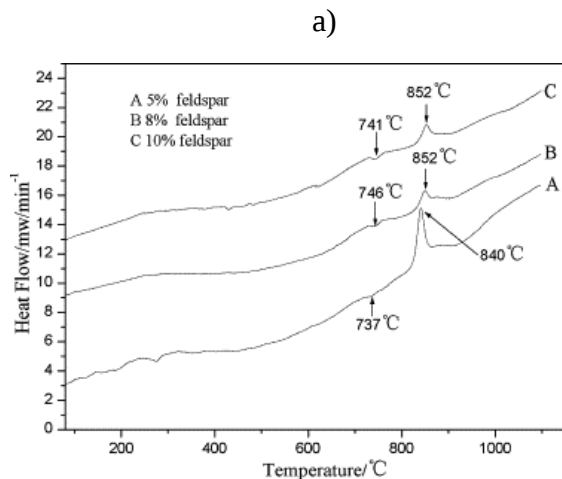


Figura 5. Curvas DCS a muestras.
Fuente: (Liu et al., 2009).

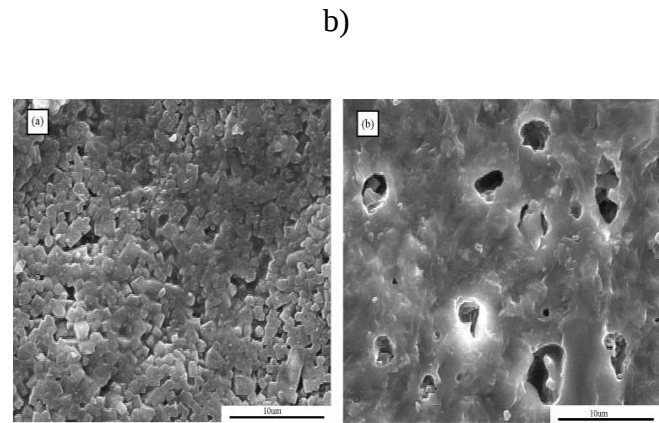


Figura 6. Microscopia electrónica de las muestras con aditivo (a) 5%, (b) 10% Fuente: (Liu et al., 2009).

(Ozdemir & Yilmaz, 2007) fabricó baldosas de vitrocerámicas a partir de la desvitrificación de un vidrio por tratamiento a 1200 °C, reemplazando arcilla natural por GBFS en proporciones de 0-100% en peso. En la Figura 7, se muestra que la baldosa de 100% arcilla presenta principalmente fases cristalinas de cuarzo (SiO_2) y mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), mientras que la baldosa 100%GBFS además de cuarzo, mostro cristalización de gelenita ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$), akermanita ($2\text{CaO}\cdot\text{MgO}_2\cdot\text{SiO}_2$), anortita ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), wollastonita y enstatita ($\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$). Las fases cristalinas adicionales embebidas dentro de fases vítreas confieren resistencias mecánicas comparables a las realizadas con arcilla natural y estas dependen de la cantidad de GBFS reemplazada, la cual es limitada por el aumento de la porosidad y la absorción de agua. (Tsuyuki & Koizumi, 1999) menciona que la modificación de las estructuras vítreas y fases cristalinas en las reacciones de activación por hidratación se deben a la contribución de los silicatos cálcicos hidratados cuando son dominantes, los cuales están asociados al incremento del área superficial Blaine de la GBFS.

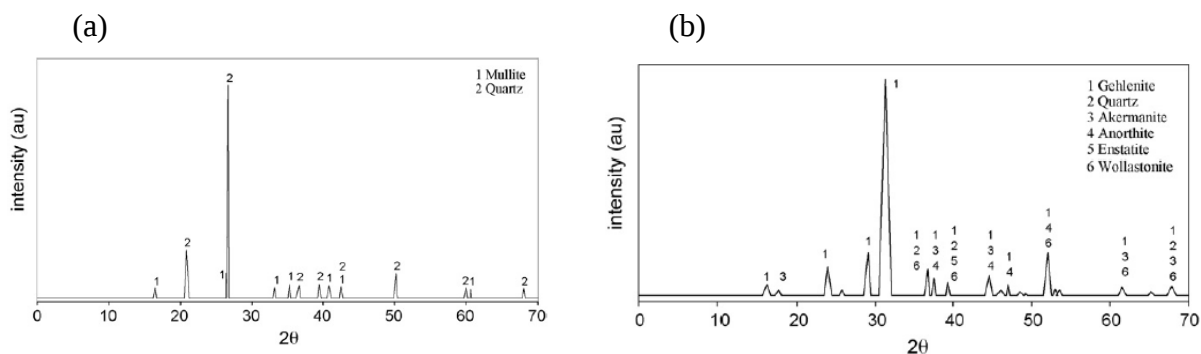


Figura 7. XRD después sinterizado 1200°C por 1h (a) 100% Arcilla (b) 100% GBFS.
Fuente: Adaptado de (Ozdemir & Yilmaz, 2007).

3.2.1 Vitrocerámicas espumadas a partir de GBFS y vidrio reciclado

Las vitrocerámicas espumadas o porosas son materiales que tienen buenas propiedades tales como baja densidad, baja conductividad térmica, buena resistencia al choque térmico, entre otras, es por eso que (Ding et al., 2015) en búsqueda de desarrollar estas, se encontró que actualmente para la fabricación de las vitrocerámicas espumadas se utilizan varios residuos industriales solidos como cenizas volantes, lodos rojos, residuos de construcción y demolición (RCD), entre otros. Sin embargo, durante el estudio literario encontraron pocas investigaciones respecto al uso de GBFS como materia prima. Es por esto, que (Ding et al., 2015) produjeron vitrocerámicas espumadas a partir de GBFS y vidrio reciclado (e-glass) como materias primas, eligiendo TiO_2 , ZrO_2 y CaF_2 como agentes nucleantes, y agregando CaCO_3 , $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como agente espumante, estabilizador de la espuma y agente fundente, respectivamente. Las muestras se prepararon siguiendo la curva de DSC para la fabricación de vidrio convencional, la cual indica que la temperatura de cristalización y nucleación es de 750°C y 950°C respectivamente (Figura 8).

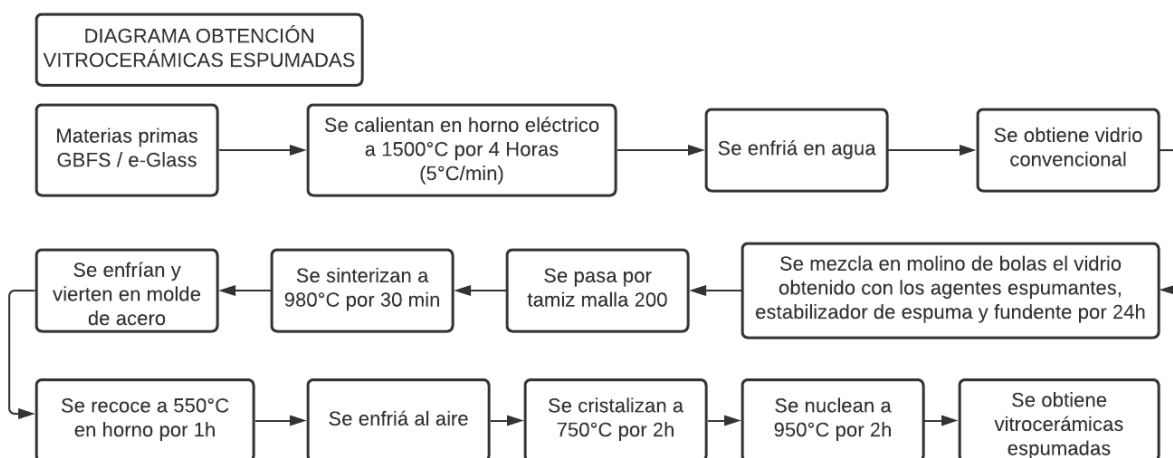


Figura 8. Diagrama para la obtención de vitrocerámicas espumadas
Fuente: Autoría propia, a partir del artículo de (Ding et al., 2015)

La Figura 9 muestra las diferentes morfologías que se presentan en las diferentes composiciones, donde (b) muestra que los poros tienen una distribución de tamaño más uniforme respecto a las otras. Para la obtención de las muestras, se usaron diferentes composiciones donde la que presentó mejores resultados fue 50% GBFS- 50% Vidrio reciclado (% en peso), ya que mostró excelentes propiedades como una baja densidad aparente ($0,79 \text{ g/cm}^3$), baja absorción de agua (2,71%) y alta resistencia a la flexión (14,34 MPa). Esto indicó que la preparación de espumas vitrocerámicas es una buena manera de reciclar la GBFS, así mismo podría generar enormes beneficios económicos y ambientales al reducir el gasto energético ya que producir vitrocerámica de materia prima virgen demanda el uso de temperaturas elevadas por encima de los 1000°C . Las vitrocerámicas espumadas se pueden utilizar en una amplia gama de aplicaciones industriales tales

como filtros de partículas en motores diésel, filtros biológicos para el tratamiento de aguas y aguas residuales y aislantes térmicos de alta temperatura para ahorrar energía.(Yio et al., 2021)

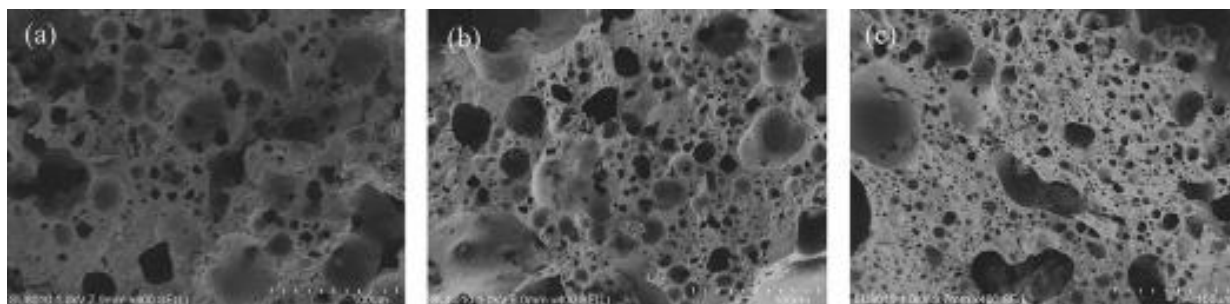


Figura 9. Microscopia electrónica (SEM) (a)35%GBFS (b)50%GBFS (c)55%GBFS

Fuente: Tomado de (Ding et al., 2015).

(Montoya-Quesada et al., 2020) encontró que es viable producir vitrocerámicas a partir de GBFS, FA, residuos de vidrio y escoria de cobre. El control de las mezclas lo realizó a partir del estudio de la relación CaO/SiO_2 entre 0,17-0,39, por consiguiente, demostró la habilidad de estos materiales para obtener vitrocerámicas del tipo CAS con presencia de fases cristalinas Wollastonita, Akermanita, Anortita y Labradorita. El estudio acertó en encontrar la complejidad de los sistemas vítreos CAS que revelaron la coexistencia característica de todas las fases, sin embargo, la mayor fase cristalina hallada fue la labradorita, no obstante, esta es considerada una variedad de la fase anortita, la cual es del tipo mineral plagioclasa cálcica. Siendo estas fases cristalinas formadas las causantes de las propiedades mecánicas globales obtenidas comparables a los vidrios y vitrocerámicas obtenidas por otras materias primas. La microdureza obtenida osciló entre 612-701 MPa, módulo elástico de 97.8 GPa y porosidad entre 0,18-5,7%. Estos valores son cercanos y comparables a las propiedades mecánicas que presentan los materiales construcción fabricados de manera industrial como las baldosas cerámicas esmaltadas.

3.2.2 Vitrocerámicas con GBFS y ceniza volante obtenidas a partir de activación alcalina leve.

(Valderrama et al., 2019) obtuvo vitrocerámicas a partir de la mezcla de GBFS, FA y vidrio reciclado con óxido sódico (Na_2O) como óxido modificador de la red, el cual, sumado al Fe_2O_3 favorece la nucleación en las vitrocerámicas. El proceso de fabricación constó de tres etapas (i) fusión, (ii) nucleación y (iii) cristalización, cada uno por 2h. De las tres mezclas, la mezcla de 10% en peso GBFS, 35% en peso FA y 55% en peso de vidrio reciclado, obtuvo a partir del ensayo de resistencia a la compresión un valor de 10,8 MPa.

En el trabajo de grado inicialmente planteado por nosotros estaba pensado la obtención de vitrocerámicas a partir de mezclas GBFS: ceniza volante (FA) en diferentes proporciones (50 GBFS:50 FA, 75GBFS:25FA y 100GBFS:0FA), a partir de una leve activación alcalina con NaOH (2M, 3M y 4M) con el objetivo de obtener un vidrio de partida. Los materiales fueron mezclados en una mezcladora Hobart y vaciados en moldes cúbicos de 2 cm x 2 cm x 2 cm de lado. El vidrio de partida fue analizado por medio un análisis térmico diferencial (SDTQ 600, TA Instruments a

una velocidad de calentamiento de 10°C/min, en flujo de Nitrógeno de 100ml/min hasta una temperatura máxima de 1000°C) con el objetivo de encontrar las temperaturas de posterior tratamiento térmico. La mezcla 75GBFS:25FA activada alcalinamente con NaOH 2M no mostró los picos endotérmicos y exotérmicos en el flujo de calor característicos, la primera derivada del peso nos muestra inicialmente la pérdida de humedad, luego la descomposición de las geles y finalmente la descarbonatación de la cal emitiendo CO₂ (Figura 10) y una resistencia mecánica en verde de 15,8 MPa, mostrando evidencia que si podría haberse obtenido un material tipo vitrocerámicas a partir de GBFS y FA. Sin embargo, se aclara que debido a la pandemia mundial por Covid-19 no fue posible continuar los ensayos experimentales y comprobar la obtención de las vitrocerámicas.

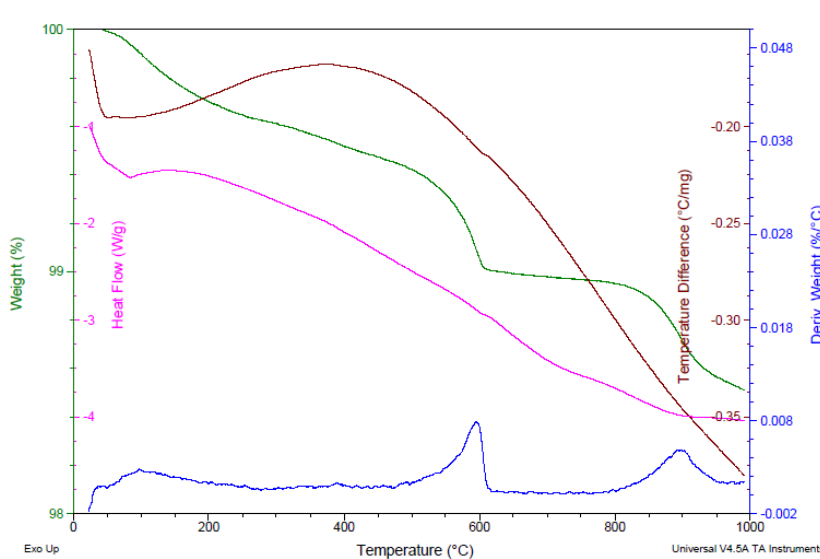


Figura 10. DSC muestra 75GBFS:25FA.

Fuente: Autoría propia.

3.3 Uso de GBFS para la producción de materiales aglomerantes.

Cerca del 77% de las publicaciones estudiadas en esta revisión utilizan la GBFS y FA, como materia prima en la obtención de materiales cementantes suplementarios (Mohammadinia et al., 2016)(Sargent et al., 2016)(Kang et al., 2019)(Majhi & Nayak, 2020)(Ortega et al., 2017). Es sabido que la industria cementera de cemento Portland (OPC) aporta entre 5 - 9% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial, además se ha estimado que la producción de 1 tonelada de OPC emite aproximadamente 1 tonelada de CO₂ (Noorliyana et al., 2013)(Paul & Hussain, 2020)(Darweesh, 2017)(Azad & Samarakoon, 2021) (Parihar & Verma, 2020). La industria cementicia en su plan de disminución de impacto ambiental ha generado diferentes estrategias orientadas a la disminución de la generación de gases efecto invernadero, reducción de la energía requerida en la producción del OPC siendo la (i) la utilización de adiciones provenientes de diferentes tipos de subproductos industriales en mezclas cementicias de OPC, (ii) generación de nuevos aglomerantes de baja huella de carbono y (iii) el co-procesado de residuos industriales para su utilización como combustible las rutas enmarcadas para hacer la industria cementera sostenible (Elchalakani et al.,

2017)(Rajamane et al., 2012). De estas, los materiales cementantes suplementarios (MCS) son una alternativa que permiten alcanzar reducciones considerables en las emisiones de CO₂, es así como la GBFS y la ceniza volante son usadas típicamente como MCS que, mezclados con el OPC, contribuyen a la reducción del potencial de calentamiento global pues la reducción del uso de una tonelada de OPC evita la emisión de aproximadamente una tonelada de CO₂. El OPC es la principal materia prima para la fabricación de concreto, el material de construcción mayormente utilizado a nivel mundial, y en el caso de los concretos de alto desempeño, la huella de carbono es considerada mayor al utilizar un porcentaje de OPC (tres veces superior al concreto tradicional). Estos concretos autocompactantes se caracterizan por la ausencia de agregados gruesos, poseer mayor densidad y una microestructura más homogénea y compacta (Abdulkareem et al., 2018). Para el año 2012, se estimó en 16.600 millones de toneladas de agua, las requeridas para la producción de concreto, representando el 18% del consumo mundial de agua industrial (Luukkonen et al., 2020).

Las escorias de alto horno son ricas en cal y silicatos, y durante los procesos de hidratación y curado ocurre un efecto conocido como reacción puzolánica, la cual requiere periodos prolongados y pH superiores a los 10.5. Es habitual encontrar a través de microscopía electrónica de barrido geles del tipo silicato cálcico hidratado C-S-H (ver Figura 11a), portlandita C-H (ver Figura 11b) y aluminato cálcico hidratado C-A-H. También se encuentran matrices cementicias originadas por reacciones químicas de polimerización que son conocidas como geo-polímeros; estas ocurren en presencia de activadores de carácter alcalino (pH>12) permitiendo el intercambio catiónico y al favorecer la disolución de la sílice y la alúmina, se facilita la formación de los aluminosilicatos (Sharma & Sivapullaiah, 2016)(Azad & Samarakoon, 2021)

Se ha encontrado que la utilización de GBFS en la fabricación de MCS beneficia la reducción del calor de hidratación, y permite encontrar una microestructura modificada que favorece la reducción de la permeabilidad y por ende la inserción de sales solubles, lo que lleva a tener un mejor desempeño en estas condiciones de servicio. (Proske et al., 2013)(Elchalakani et al., 2014). Al comparar la reacción geopolimérica con la reacción puzolánica en mezclas de OPC y GBFS, las primeras presentan menor calor de hidratación y consecuentemente los concretos son más densos, mejorando su resistencia a la compresión en edades tempranas, resistencia química y estabilidad térmica, mientras que la mezcla OPC/GBFS favorecen la reducción del uso del cemento Portland. (Sharma & Sivapullaiah, 2016) (Mas et al., 2012) (Ganesh & Murthy, 2019) (Yang et al., 2016) (Elchalakani et al., 2017) (Rajamane et al., 2012) (Kang et al., 2019).

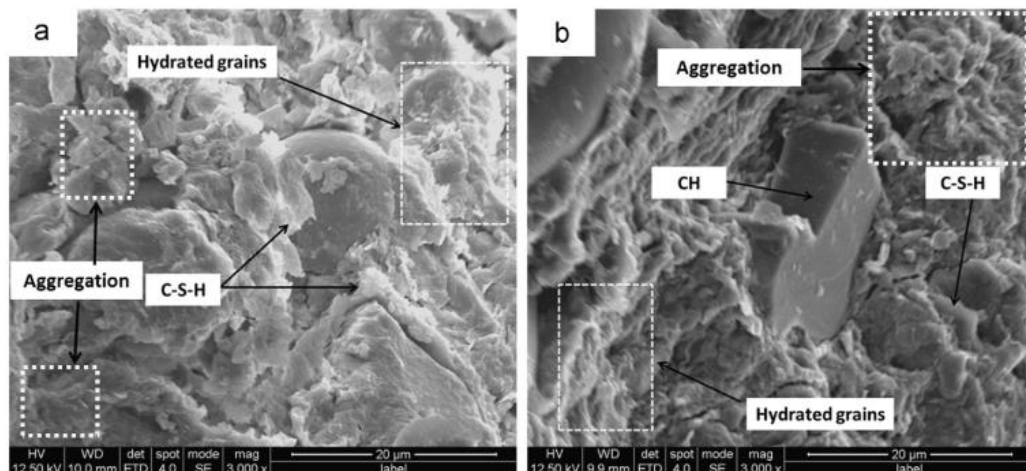


Figura 11. SEM de suelo expandido con 20% de aglutinante (a) sin cal (b) con cal.
Fuente: (Sharma & Sivapullaiah, 2016)

(Gholampour et al., 2021) desarrollaron morteros basados de OPC con remplazo parcial por GBFS, FA y vidrio en polvo. Encontrando que mezclas 20%OPC - 80%GBFS y arena obtenida a partir de vidrio reciclado, alcanzan resistencia a los 28 días de 37 MPa y a los 56 días de 41,9 MPa, siendo comparables a los morteros de referencia sin incorporación de residuos. (Elchalakani et al., 2014) encontraron concretos sostenibles se pueden obtener a partir del uso de 90% en peso de GBFS con 10% en peso de OPC (Tipo CEM I 42.5N), con resistencia a la compresión a los 28 días de 30,5 MPa y 56 días de 34 MPa. (Abdulkareem et al., 2018) encontraron que concretos de ultra alto desempeño se les puede sustituir hasta un 30% en peso de OPC (Tipo CEM I 52.5 N) con escoria de alto horno activada con KOH, obteniendo una mejor trabajabilidad, aumento de la densidad de empaquetamiento e hidratación del cemento, permitiendo valores altos de resistencia a la compresión temprana, específicamente a los 3 y 7 días de 80 MPa y 100 MPa, respectivamente.

Los concretos activados alcalinamente son obtenidos a través de mezclas de cenizas volantes, humo de sílice y/o metacaolines con porcentajes bajos de calcio y en presencia de un activador alcalino que permite su reacción. Los geopolímeros son arreglos tridimensionales de moléculas idénticas conocidas como monómeros, los cuales, se unen a través de una reacción química formando cadenas. Un activador alcalino es necesario para la reacción y uno de los más comunes es el NaOH (Nagendra Reddy et al., 2017)(Darweesh, 2017) (Parihar & Verma, 2020) (Dave et al., 2020) (Kumar et al., 2020) (Lakshmi Narayanan & Vasugi, 2019)(Shang et al., 2018).

(Darweesh, 2017) realizó estudios de resistencia a la compresión, densidad y porosidad aparente sobre cementos por activación alcalina preparados a partir de GBFS, ceniza volante o humo de sílice, los cuales fueron activados con NaOH. La mezcla con 80% GBFS - 20% humo de sílice con 3M de NaOH obtuvo una resistencia a la compresión de 47 MPa a tan sólo 3 días, así como también una menor porosidad y mayor densidad. Mezclas de 90% GBFS- 10% humo de sílice con 2M de NaOH alcanzaron 45 MPa a los 3 días. En el análisis que se extendió por 90 días se encontró que la resistencia a la compresión aumenta progresivamente, lo cual indicó que la

densificación continuó, indicando que las geles CSH y CAH se continuaron formando y precipitando y finalmente disminuyeron la porosidad en la pasta de cemento endurecida. (Angulo-Ramírez et al., 2017) estudiaron la mezcla de 80% GBFS y 20% OPC como materia prima para concretos híbridos activados alcalinamente. El autor encontró una resistencia a la compresión temprana (1 día) 4,5 veces más alta que un mortero de OPC, y dentro del estudio de espectrografía infrarroja se constató la presencia de enlaces fuertes Si-O característicos de las fases silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminosilicatos de calcio hidratado (CASH), evidencia de la reacción por activación alcalina.

3.4 Uso de GBFS en la fabricación de elementos de mampostería

Los materiales de construcción obtenidos a partir de arcillas contribuyen a desarrollo económico y construcciones sostenibles. Sin embargo, la extracción de arcilla primaria como materia prima junto con la quema de estos materiales desencadena un impacto considerable en el medio ambiente por su consumo energético y emisiones de CO₂. Como alternativa a la producción de ladrillos tradicionales, el uso de OPC se ofrece como una opción reciente para la estabilización de estas arcillas y estudios muestran que ofrecen resistencias a la compresión y contracción similares a los ladrillos sinterizados (Oti & Kinuthia, 2012). En la realización de ladrillos de forma tradicional los procesos han sido optimizados permitiendo recuperar el calor generado durante la sinterización para realizar un secado controlado de estos, además la incorporación de subproductos industriales tales como escorias de alto horno, cenizas de fondo, cenizas volantes, cenizas de incineradores municipales, residuos de boro, canteras de tierra, desperdicios de demolición, lodos de aguas residuales, humo de sílice, aguas blancas papeleras, vidrio reciclado, han permitido el aprovechamiento de estos para reducir el consumo de materia prima virgen (Azad & Samarakoon, 2021). Otro camino para disminuir el impacto ambiental en la fabricación es la incorporación de GBFS, la cual permite aumentar el contenido de CaO en estos, lo que contribuye a facilitar las reacciones de hidratación y la presencia de sus productos como las geles CSH, y los aluminatos calcicos hidratados CAH y CASH, además de las reacciones puzolánicas, las cuales reducen la porosidad y aumentan la resistencia a la compresión al doble al compararse con los ladrillos los obtenidos de arcilla natural. (Kinuthia & Oti, 2012)

(Murali Mohan Rao et al., 2017) estudió la escoria de alto horno para sustituir a la arena natural como agregado fino, encontró que la GBFS puede sustituirla hasta un 50% de la mezclas OPC/Agregado fino en un ratio 1:3 y hasta un 25% en mezclas OPC/Agregado fino 1:4. Las mezclas obtuvieron unos valores de resistencia a la compresión de 55MPa y 51,82MPa, respectivamente. El estándar de la India considera que 53MPa debe ser la resistencia a la compresión para un mortero de OPC.

Los adoquines son bloques de concreto, los cuales se realizan a partir de pasta de cemento, siendo un material de construcción ampliamente usado por la facilidad de obtener diferentes formas, extensa durabilidad y ser caminables. (Jalull et al., 2014) encontró que se pueden obtener adoquines con resistencia a la compresión y tensión satisfactoria mezclando OPC 50%- GBFS 45% con 5% de polvo de horno de cemento. La resistencia a la compresión arrojó un resultado de

39,76 MPa, y 5,86 MPa de resistencia a la tensión. (Ganjian et al., 2015) mostró que la GBFS es mejor sustituto del OPC como material cementicio que otras escorias de origen industrial. Encontró que la mezcla de OPC/GBFS/Polvo de horno de cal con relaciones 7,0/6,3/0,7, proporcionó la resistencia tensil mínima necesaria para los adoquines, por consiguiente, cumple con el estándar inglés que es de 3,6 MPa.

(Mejía-Arcila et al., 2020) en su estudio propusieron utilizar dos tipos de aglutinantes con base en ceniza volante como materia prima, escoria de Alto Horno y OPC como fuente de calcio, para la producción de materiales de construcción prefabricados como adoquines peatonales y bloques de mampostería los cuales cumplieron con los estándares técnicos requeridos en Colombia. Para esto utilizaron dos tipos de ligantes, FA70/30GBFS (ligante binario) y FA80/20OPC (ligante híbrido) y usaron como activador tradicional una mezcla de Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio (SN) y como activadores alternativos la mezcla de cascarilla de arroz (RHA) y NaOH (RN) obteniendo resultados donde muestran la posibilidad de obtener un cemento binario (FA / GBFS-RN) de resistencia a la compresión de hasta 38 MPa después de curar durante 28 días y 65 MPa después de curar durante 360 días y el ligante híbrido (FA / OPC-RN) reportó 30 MPa y 61 MPa a la misma edad de curado. Teniendo en cuenta los resultados, seleccionaron la pasta (FA / GBFS-RN) como el material óptimo para la producción de bloques de mampostería y adoquines peatonales ya que cumplieron con los estándares colombianos (ver Figura 12).

Material	Propiedad	Especificación	Resultados
NTC 4062 Bloque	Resistencia a la compresión (MPa)	13	16,7 ± 0,72
	Densidad (kg/m ³)	Entre 1680 y 2000	1894 ± 16,90
	Absorción (%)	12	8,1 ± 1,14
Adoquín NTC 2017	Resistencia a la flexión (MPa)	4,2 - 5	4,3 ± 0,88
	Absorción (%)	Máximo 7	6,63 ± 0,25
	Espesor (mm)	Máximo 23	20,4 ± 1,3

Figura 12. Propiedades mecánicas y física, después de 28 días de curado. Fuente: (Mejía-Arcila et al., 2020)..

3.5 Fabricación de paredes de tierra apisonada

Recientemente se ha estudiado el uso de aglutinantes alternativos para sustituir el cemento en las paredes de adobe. (A. H. Meek et al., 2021) encontró que una mezcla de tierra apisonada con GBFS activada alcalinamente, ladrillo reciclado y cemento ofrecieron resistencias a la compresión de 24,07 MPa mientras que la mezcla de piedra caliza triturada sin la adición de GBFS ofreció una resistencia a la compresión de 21,08 MPa. La alta alcalinidad proporcionada por el hidróxido de sodio y la presencia de iones Al y Si, desarrollaron la resistencia a la compresión. La

presencia de cal origina productos de reacción del tipo silicatos cálcicos hidratados y silicato-aluminatos cálcicos hidratados (CSH y CASH) (Figura 13).

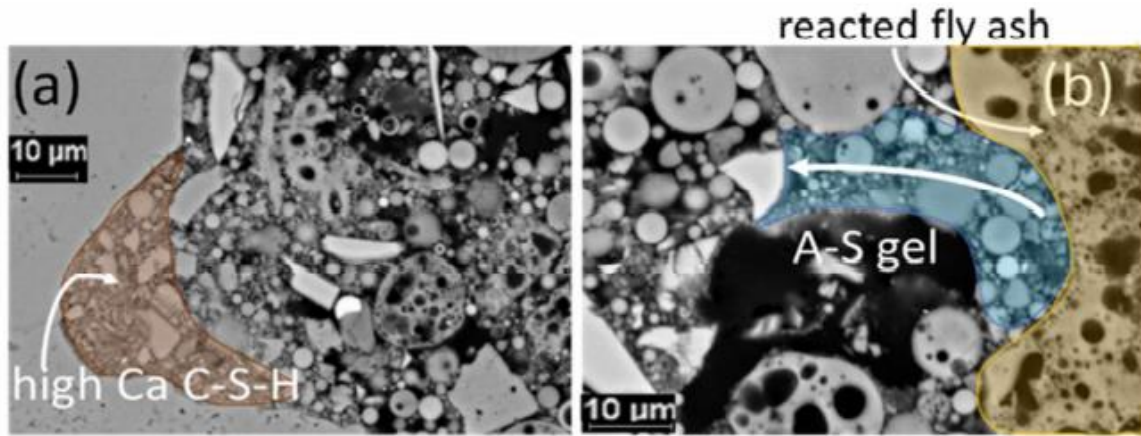


Figura 13. Cal fina autoactivada. (a) Gel C-S-H con alto Ca, (b) gel aluminosilicato rodeado de ceniza volante activada. Fuente: (A. Meek, 2020).

(Arslan et al., 2017) comparó el uso de 10% en peso de OPC (CEM I 42.5 R) como aglutinante, el cual ofreció una resistencia a la compresión de 8,34 MPa. Lo comparó con 5% en peso de OPC con 5% en peso de GBFS donde la resistencia a la compresión se redujo levemente a 7,80 MPa. Sin embargo, al evaluarse el comportamiento de estas paredes ante una prueba de carga cíclica, la mezcla de paredes de adobe realizadas con la mezcla GBFS/OPC mostraron una disipación de energía casi 4 veces inferior a la mezcla OPC y fue evidente el deterioro de la primera (ver Figura 14b).

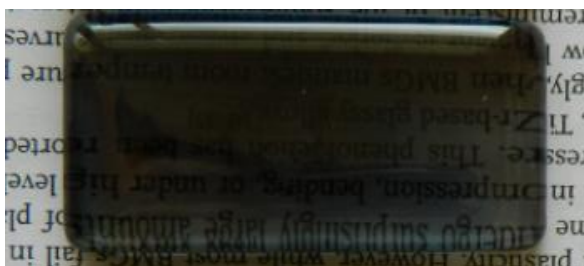


Figura 14. Paredes de tierra apisonada (a) Aglomerante 10% OPC (b) Aglomerante 5% OPC y 5% GBFS. Fuente: (Arslan et al., 2017).

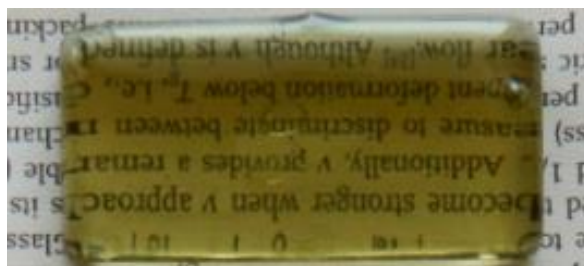
3.6 Obtención de vidrios con GBFS

Los vidrios de fosfatos son formaciones vítreas a partir de óxidos de fósforo transformados a alta temperatura, que se diferencian de los vidrios de silicatos en su matriz puesto que estos se forman a partir de óxidos de silicio. Estos vidrios son ampliamente usados en aplicaciones de

ingeniería y su procesamiento es relativamente sencillo. Sin embargo, con el fin de aprovechar elementos de desperdicios, llamados actualmente subproductos, los cuales, son destinados a aplicaciones que no son traslúcidas, se generó un interés de incorporar GBFS y cenizas volantes a matrices de vidrios de fosfatos con el fin de bajar los costos de producción y conservar las propiedades traslúcidas del material (ver Figura 15). En términos ambientales también se logró un ahorro al bajar la temperatura de transición vítrea y punto de fusión alrededor de 140 °C y 575°C respectivamente (Justino De Lima et al., 2018).



(A)



(B)

Figura 15. (A) 75KPO3-12.5Escoria-12.5Al₂O₃, (B) 75KPO3-12.5Ceniza Volante-12.5Al₂O₃.

Fuente: Adaptado de (Justino De Lima et al., 2018).

(Ozie Méndez Guerrero et al., 2011) obtuvo vidrios a partir de GBFS y Casco de vidrio al analizar la composición de los componentes reciclados y adaptar la mezcla con el fin de que la muestra tuviera 70% formadores de vidrios (SiO₂ y Fe₂O₃) y 30% modificadores de red (CaO y Na₂O), finalmente encontró la relación vidrio/escoria apropiada en proporciones 50:50 y 55:45, respectivamente. El vidrio se moldeó a partir de una rampa de ascenso de temperatura de 10°C/min hasta alcanzar 1450°C y sostenido por dos horas, una vez logrado el estado líquido se vació en un molde obteniéndose un vidrio negro, brillante y con apariencia de espejo (ver Figura 16).



Figura 16. Vidrio 50% escoria, 50% Casco de vidrio.

Fuente: Tomado de (Méndez et al. 2011)

3.7 Baldosas con escorias

Las baldosas son materiales de construcción manufacturados a partir de materias primas naturales, como arcilla, sílice y feldespatos. Debido a la presión ambiental es necesario sustituir la

sílice en esta producción, por esta razón se utilizan desperdicios tales como vidrios de ventanas, botellas, lámparas y monitores viejos. Sin embargo, las GBFS y las escorias de hornos eléctricos podrían sustituir de manera eficiente los reforzamientos de silicatos cálcicos. (Teo et al., 2014) mostró que la GBFS usada como sustituto parcial de la arcilla natural 40% en peso y en presencia de sílice 20% en peso, arcilla natural 30% en peso y feldespatos 10% en peso, se podía fabricar unas baldosas con ligeramente mayor resistencia a la flexión que las comerciales y a su vez de menor porosidad. A través del análisis de la microestructura por SEM (Figura 17) encontraron formación de fases cristalinas como Anortita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-2SiO}_2$) y Wollastonita (CaO-SiO_2).

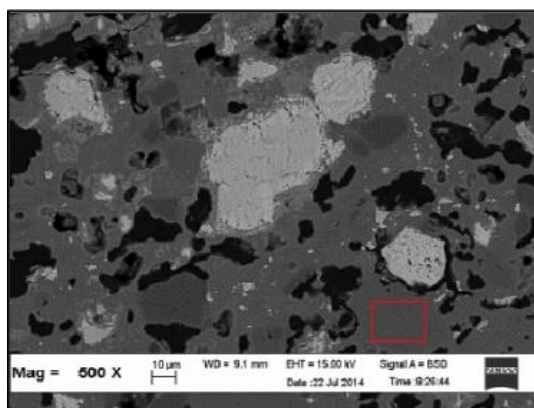


Figura 17. Imágen de SEM Baldosas y EDX en punto rojo: 51,67% O, 29,57% Si, 9,87% Al y 8,93% Ca. Fuente: (Teo et al., 2014).

(Ghosh et al., 2002) encontraron que la realización de baldosas cerámicas a partir de GBFS de en la India, era viable, reemplazaron un porcentaje de la arcilla común de hasta un 80% por la escoria. Encontrando que los procesos de sinterización a 1200°C permitieron la formación de las fases wollastonita y enstatita características de las baldosas realizadas con subproductos, en las baldosas que realizaron a partir de 100% arcilla encontraron la formación de un 57% de vidrios silicatos, 21% de vidrios aluminosilicatos y solo 5% de Wollastonita. Cuando sustituyeron el 80% de arcilla con GBFS, no se encontró vidrio silicato, pero apareció la fase Mullita en un 33%, la Wollastonita llegó al 50% y la enstatita 16%. En porcentajes bajos de sustitución de GBFS se encuentran cristales largos y mayores fases vítreas, a pesar de que la escoria que usaron tenía menor cantidad de CaO que otras escorias, el efecto de sustituir GBFS por arcilla permitió el incremento progresivo de la Wollastonita.

4. Conclusiones

El uso de GBFS para el reemplazo parcial o total a las materias primas naturales en la fabricación de materiales de construcción como vitrocerámicas, morteros, concretos, ladrillos, adoquines, entre otros, es una gran alternativa desde el punto de vista del desarrollo sostenible en el campo de la construcción, siempre y cuando se generen las características en la microestructura adecuadas para cada aplicación.

Las vitrocerámicas obtenidas por modificación con GBFS y ceniza volante, presentan en general formación de fases cristalinas como gelenita, wollastonita, akermanita, anortita, entre otros; las cuales le confieren propiedades de dureza entre 612-667 MPa, resistencia a flexión entre 85-90 MPa, resistencia química cercana al 100%.

La utilización de la GBFS como adición puzolánica para mezclas cementicias basadas en cemento Portland se basa en la reacción puzolánica de la escoria con la portlandita del cemento, la cual con el paso del tiempo le confiere propiedades de mayor dureza y menor porosidad, en comparación a morteros y concretos convencionales 100% de OPC.

La reutilización de la GBFS 100% puede darse a partir de la generación de materiales cementicios alternativos como son los morteros y concretos activados alcalinamente con soluciones de NaOH y/o silicato de sodio. Estos concretos poseen características comparables a los geopolímeros los cuales presentan como características un menor calor de hidratación, que favorece la densificación, resistencia a la compresión elevada en edades tempranas y una durabilidad a largo plazo al tener una permeabilidad reducida, permitiendo un mejor comportamiento a diferentes condiciones de servicio comparado con las matrices hidratadas tradicionales del cemento portland.

En Colombia la Escoria de Alto Horno producida por Acerías Paz del Río es utilizada como materia prima en los procesos de clinkerización en las industrias cementeras de Boyacá, sin embargo, existe la oportunidad de utilizar las GBFS como materias primas de adoquines, baldosas, ladrillos, estabilización de suelos, vitrocerámicas y concretos, muchas investigaciones son llevadas a cabo acerca de estos usos.

Existe un nicho poco investigado que son los vidrios fosfatados traslúcidos con el cual se podrían estudiar otras adiciones de GBFS, tratamientos térmicos y precursores.

Agradecimientos

A la Universidad del Valle y al Grupo de Materiales Compuestos (GMC) por poner a nuestra disposición laboratorios, bases de datos, asistencias de docentes, entre otros servicios.

A nuestro grupo de amigos como Estefannía Rodríguez, Carolina Domínguez, Juan Felipe Rodríguez, Danilo Vargas, Mónica Castillo, por siempre estar apoyándonos y darnos la mano en los momentos que fueron necesarios.

A nuestra familia por permitirnos tomar el tiempo suficiente para realizar nuestros estudios y continuar nuestras jornadas laborales.

5. Referencias

- Abdulkareem, O. M., Ben Fraj, A., Bouasker, M., & Khelidj, A. (2018). Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. *Construction and Building Materials*, 163, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.107>
- Albert, E. B., Carda Castelló, J. B., & Pla, J. L. (2015). Potentiality of a frit waste from ceramic sector as raw material to glass-ceramic material production. *Boletín de La Sociedad Española*

- de Ceramica y Vidrio*, 54(3), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.05.002>
- Angulo-Ramírez, D. E., Mejía de Gutiérrez, R., & Puertas, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Construction and Building Materials*, 140, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092>
- Arslan, M. E., Emiroğlu, M., & Yalama, A. (2017). Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 133, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.093>
- Azad, N. M., & Samarakoon, S. M. S. M. K. (2021). Utilization of industrial by-products/waste to manufacture geopolymer cement/concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13020873>
- Başaran, C., Canikoğlu, N., Özkan Toplan, H., & Toplan, N. (2016). The crystallization kinetics of the MgO–Al₂O₃–SiO₂–TiO₂ glass ceramics system produced from industrial waste. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(2), 695–701. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5139-2>
- Byrapa, K., & Yoshimura, M. (2001). Handbook of hydrothermal technology - A Technology for Crystal Growth and Materials Processing. In 2001 (Vol. 1).
- Darweesh, H. H. M. (2017). Geopolymer cements from slag, fly ash and silica fume activated with sodium hydroxide and water glass. *InterCeram: International Ceramic Review*, 66(6), 226–231. <https://doi.org/10.1007/bf03401216>
- Dávalos, J., Bonilla, A., Villaquirán-Caicedo, M. A., de Gutiérrez, R. M., & Rincón, J. M. (2020). Preparation of glass-ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002>
- Dave, N., Sahu, V., & Misra, A. K. (2020). Development of geopolymer cement concrete for highway infrastructure applications. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(5), 1321–1333. <https://doi.org/10.1108/JEDT-10-2019-0263>
- Ding, L., Ning, W., Wang, Q., Shi, D., & Luo, L. (2015). Preparation and characterization of glass – ceramic foams from blast furnace slag and waste glass. 141, 327–329.
- Elchalakani, M., Aly, T., & Abu-Aisheh, E. (2014). Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2013.11.001>
- Elchalakani, M., Basarir, H., & Karrech, A. (2017). Green Concrete with High-Volume Fly Ash and Slag with Recycled Aggregate and Recycled Water to Build Future Sustainable Cities. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016219. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001748](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001748)
- Francis, A. A., Rawlings, R. D., & Boccaccini, A. R. (2002). Glass-ceramics from mixtures of coal ash and soda-lime glass by the peturgic method. *Journal of Materials Science Letters*, 21(12), 975–980. <https://doi.org/10.1023/A:1016094211224>
- Ganesh, P., & Murthy, A. R. (2019). Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. *Construction and Building Materials*, 197, 667–680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.240>
- Ganjian, E., Jalull, G., & Sadeghi-Pouya, H. (2015). Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 77, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048>
- Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T., & Ngo, T. D. (2021). Development of a waste-based eco-friendly structural mortar without Portland cement and natural sand. *Structural Concrete*,

- 22(S1). <https://doi.org/10.1002/suco.202000096>
- Ghosh, S., Das, M., Chakrabarti, S., & Ghatak, S. (2002). Development of ceramic tiles from common clay and blast furnace slag. *Ceramics International*, 28(4), 393–400. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00107-9)
- Jalull, G., Ganjian, E., & Sadeghi-Pouya, H. (2014). Using ground granulated blastfurnace slag and mineral wastes to reduce cement in paving block. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 167(2), 91–103. <https://doi.org/10.1680/coma.13.00011>
- Justino De Lima, C. L., Veer, F. A., Çopuroğlu, O., & Nijssse, R. (2018). New phosphate glasses containing industrial waste and their applications for building engineering. *Heron*, 63(1–2), 31–55.
- Kang, S. H., Kwon, Y. H., Hong, S. G., Chun, S., & Moon, J. (2019). Hydrated lime activation on byproducts for eco-friendly production of structural mortars. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1389–1398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.313>
- Kinuthia, J. M., & Oti, J. E. (2012). Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use. *Applied Clay Science*, 59–60, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.02.021>
- Kumar, D. S. S., Chethan, K., & Kumar, B. C. (2020). Effect of Elevated Temperatures on Sugarcane Bagasse Ash-Based Alkali-Activated Slag Concrete. *Sugar Tech*. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00898-9>
- Lakshmi Narayanan, A. R., & Vasugi, K. (2019). Study of corrosion of steel bars in Ggbs based geopolymer concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(6), 1747–1752.
- Lee, J.-Y., Choi, J.-S., Yuan, T.-F., Yoon, Y.-S., & Mitchell, D. (2019). *Comparing Properties of Concrete Containing Electric Arc Furnace Slag and Granulated Blast Furnace Slag*. 1–11.
- Liu, H., Lu, H., Chen, D., Wang, H., Xu, H., & Zhang, R. (2009). Preparation and properties of glass-ceramics derived from blast-furnace slag by a ceramic-sintering process. *Ceramics International*, 35(8), 3181–3184. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.05.001>
- Luukkonen, T., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). Sustainable batching water options for one-part alkali-activated slag mortar: Sea water and reverse osmosis reject water. *PLoS ONE*, 15(11 November), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242462>
- Majhi, R. K., & Nayak, A. N. (2020). Production of sustainable concrete utilising high-volume blast furnace slag and recycled aggregate with lime activator. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120188>
- Mas, B., Cladera, A., Bestard, J., Muntaner, D., López, C. E., Piña, S., & Prades, J. (2012). Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Construction and Building Materials*, 34, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.092>
- Meek, A. (2020). *Sustainable housing in Australia: development of rammed earth materials and quantification of environmental benefits of their wider use*. June, 2020.
- Meek, A. H., Elchalakani, M., Beckett, C. T. S., & Dong, M. (2021). Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: A study of mechanical properties, flexure and bond strength. *Construction and Building Materials*, 277, 122303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122303>
- Mejía-Arcila, J., Valencia-Saavedra, W., & Mejía de Gutiérrez, R. (2020). Eco-efficient alkaline activated binders for manufacturing blocks and pedestrian pavers with low carbon footprint: Mechanical properties and LCA assessment. *Materiales de Construcción*, 70(340), 1–15. <https://doi.org/10.3989/MC.2020.17419>
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Win Bo, M., & Darmawan, S.

- (2016). Stabilization of Demolition Materials for Pavement Base/Subbase Applications Using Fly Ash and Slag Geopolymers: Laboratory Investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016033. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001526](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001526)
- Montoya-Quesada, E., Villaquirán-Caicedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2020). New glass-ceramic from ternary-quaternary mixtures based on Colombian industrial wastes: Blast furnace slag, copper slag, fly ash and glass cullet. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.11.009>
- Murali Mohan Rao, A. V., Ramesh, K. V., Vinayak, Y. S. L., & Sudheer, G. (2017). Study of granulated blast furnace slag as fine aggregate in mortar and masonry. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(8), 550–560.
- Nagendra Reddy, K., Surya Narayana, K., Damodhar Reddy, J., Sarath Chandra, B., & Himath Kumar, Y. (2017). Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solution on compressive strength of metakaolin and GGBS geopolymer. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4), 1905–1917.
- Noorliyana, H. A., Al Bakri, A. M. M., Azira, M. N., Mariamadzliza, M. N., Kamrosni, A. R., & Kamarudin, H. (2013). Alkali activated blast-furnace slag cement: The opportunity to solve sustainable issues. *Advances in Environmental Biology*, 7(SPEC. ISSUE 12), 3713–3715.
- Ortega, J. M., Sánchez, I., Cabeza, M., & Climent, M. Á. (2017). Short-term behavior of slag concretes exposed to a real in situ mediterranean climate environment. *Materials*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/ma10080915>
- Oti, J. E., & Kinuthia, J. M. (2012). Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use. *Applied Clay Science*, 58, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.011>
- Ozabaci, M., Aksan, M. A., Kirat, G., Kizilaslan, O., & Yakinci, M. E. (2016). Preparation and characterization of CaO-Al₂O₃-SiO₂ (CAS) glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 454, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.10.019>
- Ozdemir, I., & Yilmaz, S. (2007). Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(1), 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.002>
- Ozie Méndez Guerrero, D., Alicia Vázquez Méndez, B., & Álvarez Méndez, A. (2011). Obtención de un material vitrocerámico a partir de una escoria de acería mezclada con vidrio de desecho. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50(3), 143–150. <https://doi.org/10.3989/cyv.192011>
- Parihar, H. S., & Verma, M. (2020). Consequences of recycled glass powder waste as assets of flyash and GGBS based geopolymer concrete. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, 7(4), 9–14.
- Paul, A., & Hussain, M. (2020). Sustainable Use of GGBS and RHA as a Partial Replacement of Cement in the Stabilization of Indian Peat. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-0185-7>
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2013). Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*, 51, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.011>
- Rajamane, N. P., Nataraja, M. C., Lakshmanan, N., Dattatreya, J. K., & Sabitha, D. (2012). Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnace slag. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 19(5), 357–367.
- Rincón, J. M., & Romero, M. (1996). Los materiales vitrocerámicos en la construcción. *Materiales de Construcción*, 46(242–243), 91–106. <https://doi.org/10.3989/mc.1996.v46.i242-243.532>

- Romero, A. R., Toniolo, N., Boccaccini, A. R., & Bernardo, E. (2019). Glass-ceramic foams from “weak alkali activation” and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures. *Materials*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/ma12040588>
- Rondón, H., Fernández, W., Patiño, D., Ruge, J., Vacca, H., & Reyes, F. (2018). Characterization of blast furnace slag for road projects. *Revista Ingenieria de Construcción*, 33(1), 83–92.
- Sargent, P., Hughes, P. N., & Rouainia, M. (2016). A new low carbon cementitious binder for stabilising weak ground conditions through deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 56(6), 1021–1034. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.11.007>
- Shang, J., Dai, J. G., Zhao, T. J., Guo, S. Y., Zhang, P., & Mu, B. (2018). Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymer mortars modified by slag. *Journal of Cleaner Production*, 203, 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.255>
- Sharma, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016). Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*, 56(2), 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.004>
- Teo, P. Ter, Anasyida, A. S., Basu, P., & Nurulakmal, M. S. (2014). Recycling of Malaysia’s electric arc furnace (EAF) slag waste into heavy-duty green ceramic tile. *Waste Management*, 34(12), 2697–2708. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.015>
- Tsuyuki, N., & Koizumi, K. (1999). Granularity and surface structure of ground granulated blast-furnace slags. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(8), 2188–2192. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02061.x>
- Valderrama, D. M. A., Cuaspud, J. A. G., Roether, J. A., & Boccaccini, A. R. (2019). Development and characterization of glass-ceramics from combinations of slag, fly ash, and glass cullet without adding nucleating agents. *Materials*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/ma12122032>
- Yang, K. H., Moon, G. D., & Jeon, Y. S. (2016). Implementing ternary supplementary cementing binder for reduction of the heat of hydration of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 845–852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.022>
- Yio, M. H. N., Xiao, Y., Ji, R., Russell, M., & Cheeseman, C. (2021). Production of foamed glass-ceramics using furnace bottom ash and glass. *Ceramics International*, 47(6), 8697–8706. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.103>