

Materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de residuos sólidos tales como cenizas, escorias y vidrio: revisión

Glass-ceramic obtained from solid waste such as ash, slag, and glass waste: review

Estefanía Montoya - Quesada¹
Mónica A. Villaquirán-Caicedo²
Ruby Mejía de Gutiérrez³

¹Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: estefania.montoya.quesada@correounivalle.edu.co
orcid: 000-0002-5502-0370

²Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: monica.villaquiran@correounivalle.edu.co
orcid: 0000-0001-5145-0472

³Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ruby.mejia@correounivalle.edu.co
orcid: 0000-0002-5404-2738

Recibido: 08-01-2020 Aceptado: 25-06-2020

Cómo citar: Montoya-Quesada, Estefanía; Villaquirán-Caicedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2020). Materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de residuos sólidos tales como cenizas, escorias y vidrio: revisión. *Informador Técnico*, 84(2), 227-248.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2900>

Resumen

El uso de residuos y subproductos industriales como reemplazo parcial o total de materias primas vírgenes para la producción de nuevos materiales, se ha convertido en una parte vital de la gestión de desechos, lo cual ha dado lugar a tecnologías innovadoras que permiten extender su aplicación al desarrollo de nuevos productos, contribuyendo así a la menor contaminación ambiental y a los conceptos de la economía circular. En los últimos años, la tecnología de vitrificación de residuos se ha considerado un procedimiento atractivo para el tratamiento de diferentes tipos y mezclas de residuos para la obtención de vidrios y vitrocerámicas. El presente artículo realizó una revisión de investigaciones relacionadas con la producción de vitrocerámicas densas realizadas entre 1994 y 2019, específicamente las que han utilizado cenizas, escorias y residuos de vidrio. La revisión revela que se han acumulado considerables conocimientos y experiencia en el proceso de transformación de los desechos base silicatos, en productos útiles de vidrio y vitrocerámicas con propiedades similares o incluso superiores a los obtenidos a partir de materias primas no renovables, abriendo nuevos campos de aplicación en cerámicas avanzadas.

Palabras clave: vitrificación; cristalización; vidrio; tratamiento térmico; subproductos industriales.

Abstract

The use of industrial waste and by-products as a partial or total replacement of raw materials for the production of new materials has become an important part of waste management, which has given rise to innovative technologies that allow its application to be extended to the development of new products, thus contributing to less environmental pollution and the concepts of the circular economy. In recent years, waste vitrification technology has been considered an interesting alternative for treating of different waste to obtain glass and glass-ceramics. This manuscript conducted a review of research related to the production of dense glass-ceramics carried out between 1994 and 2019 years. Specifically, those that have used fly ash, granulated blast-furnace slag, and glass cullet wastes. The review reveals that considerable knowledge and experience have

been accumulated in the process of transformation silicate-based wastes into a useful glass and glass-ceramic products with properties similar or even superior to those obtained from non-renewable raw material, opening up new fields of application in advanced ceramics.

Keywords: vitrification; crystallization; glass; heat treatment; industrial wastes.

1. Introducción

Los materiales vitrocerámicos son materiales policristalinos de grano fino, formados cuando los vidrios de composiciones adecuadas son tratados térmicamente y llevados mediante una cristalización controlada al estado de menor energía, el estado cristalino (Rawlings; Wu; Boccaccini, 2006). Estos materiales combinan las propiedades especiales de las cerámicas sinterizadas convencionales con las distintivas características de los vidrios en un solo material (Höland; Beall, 2012), por lo que se consideran materiales cerámicos sofisticados debido a las características especialmente atractivas del producto final, tales como alta dureza, mínima porosidad y elevado módulo de elasticidad (Shackelford, 2005).

Históricamente, la producción de vitrocerámicas se remonta al año 1789, cuando el químico francés René-Antoine Ferchault produjo vidrio parcialmente cristalizado a partir de vidrio sódico-cálcico de botellas, dando como resultado un material opaco. Sin embargo, debido a la cristalización superficial incontrolada, el producto se deformó y presentó baja resistencia, por lo que la idea se desechó (Montazerian; Singh; Dutra, 2015). Fue a mediados de los años 50, cuando se otorgó la primera patente de invención de materiales vitrocerámicos, al químico Stanley Donald Stookey por descubrir las vitrocerámicas accidentalmente por la cristalización de fotoform, un vidrio de silicato de litio fotosensible que contiene nanopartículas de plata dispersas en la matriz (Höland; Beall, 2012; Montazerian *et al.*, 2015; Rincón; Romero, 1996). El material obtenido y patentado fue comercializado por Corning Glass Works en 1957 bajo el nombre de Pyroceram (código de vidrio 9606) (Deubener *et al.*, 2018). Desde entonces, los materiales vitrocerámicos han sido objeto de investigación en cuanto al desarrollo de nuevas composiciones químicas, implementación de agentes nucleantes, tratamientos térmicos, microestructuras, propiedades y aplicaciones como materiales de construcción (Montazerian *et al.*, 2015). Sin embargo, la escasez de ciertas reservas minerales ha conducido a la búsqueda de nuevas materias primas, entre las cuales algunos subproductos y residuos industriales han venido siendo investigados como una contribución al uso eficiente de los recursos del mundo. En particular el reciclaje y el aprovechamiento de desechos sólidos, no solo puede resolver la contaminación ambiental, sino también lograr productos con un alto valor agregado (Lu; Lu; Peng; Li; Jiang; 2014).

La producción anual de desechos sólidos es tan grande que la mayoría de estos desechos mayormente son depositados en vertederos (Lu *et al.*, 2014). De acuerdo a lo reportado por Karamberi y Moutsatsou (2004), el uso de materiales de desecho como reemplazo parcial o total de materias primas vírgenes para la producción de diferentes materiales, se ha convertido en una parte vital de la gestión de desechos en los países desarrollados. Grandes cantidades de desechos sólidos son generados en la actividad industrial y doméstica, los cuales deben ser eliminados de manera segura y económica. Es por ello, que se han implementado tecnologías innovadoras que permitan extender la utilización de residuos y subproductos, en especial los tipo aluminosilicatos, para la obtención de nuevos productos (Karamberi; Moutsatsou 2004). Las aplicaciones incluyen diferentes sectores industriales, siendo el área de materiales de construcción una de las más atractivas debido al gran volumen de materiales involucrados y la capacidad de uso del material a granel (Karamberi; Moutsatsou 2004; Lu *et al.*, 2014).

2. Metodología de la revisión de literatura

Este documento presenta una revisión de las investigaciones realizadas entre los años 1994 – 2019 para la obtención de vitrocerámicas densas a partir de residuos y subproductos industriales, tales como, cenizas, escorias siderúrgicas y residuos de vidrio, con el objetivo de conocer los alcances y las tendencias de las investigaciones que se han presentado a lo largo de las últimas décadas, complementando de esta manera las revisiones de literatura ya existentes. Las palabras claves utilizadas para la búsqueda fueron “*glass-ceramic*”, “*ash*”, “*glass-cullet*”, “*ashes*”. La ecuación de búsqueda para la revisión en la base de datos Scopus fue la siguiente:

Your query : (TITLE-ABS-KEY(“*glass-ceramic*” AND “*wastes*” AND “*ash*” OR “*slag*” OR “*glass cullet*” OR “*glass waste*” OR “*ashes*” AND NOT “*porous*” AND NOT “*foam*”) AND (EXCLUDE (PUBYEAR,2020)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE,“cp”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“re”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“cr”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“tb”)))

Al examinar en la base de datos Scopus, las publicaciones encontradas que contenían al menos uno de los desechos mencionados anteriormente, se aclara que fueron excluidas los resultados de búsqueda sobre materiales espumados y vitrocerámicas porosas; finalmente el número total de publicaciones fue de 288 artículos (Figura 1). Como se observa en la Figura 1. la tendencia en este tema es creciente, debido a que cada vez son más fuertes las regulaciones ambientales sobre disposición de residuos y se promueve aún más una economía circular donde prima la conciencia ambiental con reutilización y valorización de residuos.

De los 288 artículos encontrados, 184 utilizan cenizas, 107 escorias siderúrgicas y 69 reportan el uso de residuo de vidrio para la obtención de vitrocerámicas densas. China se ubica como el primer país con más publicaciones sobre la temática con aproximadamente el 26 %, seguido de un 16 % por Italia y un 9 % correspondiente a España de acuerdo con las fuentes de la base de datos de SCOPUS. En el continente americano la suma de las publicaciones solo corresponde a un 8 % del total.

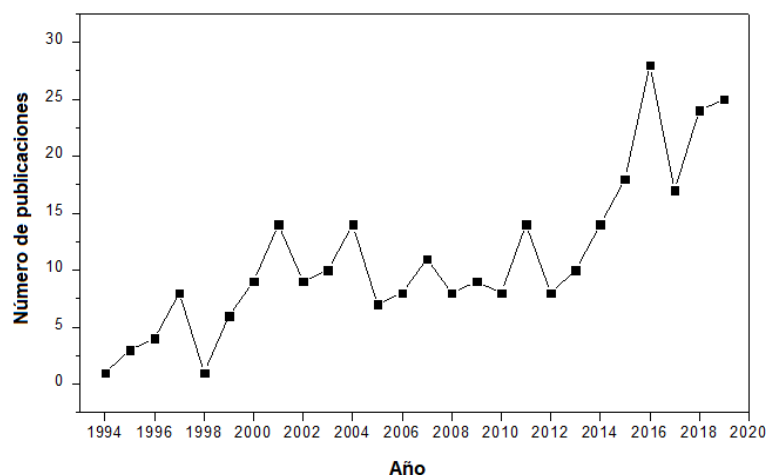


Figura 1. Número de publicaciones sobre vitrocerámicas densas obtenidas a partir de desechos tales como cenizas, escorias y residuos de vidrios examinados entre los años 1994-2019
Fuente: datos extraídos de la base de datos Scopus (2020).

La extensa literatura sugiere que las tecnologías de vidrio y vitrocerámica pueden convertir composiciones químicas complejas derivadas de los residuos de silicato en materiales útiles con aplicaciones prometedoras en el mercado, permitiendo al mismo tiempo el manejo de residuos peligrosos (Chinnam; Francis; Will; Bernardo; Boccaccini, 2013). Según lo reportado por Colombo, Brusatin, Bernardo y Scarinci (2003), la vitrificación es una tecnología bien establecida que implica la conversión de los desechos en un vidrio estable y

homogéneo (silicato), a través de un tratamiento térmico de fusión. Entre las ventajas de esta técnica se destaca la alta estabilidad química, la inmovilización de metales pesados y elementos radiactivos, la destrucción de componentes orgánicos y también que el proceso permite una gran reducción del volumen de residuos de diferente composición y forma, como líquidos, lodos, sólidos o sus mezclas, permitiendo el tratamiento de diferentes tipos de desechos, con o sin un tratamiento previo (Colombo *et al.*, 2003; Karamberi; Moutsatsou 2004).

Es así como el desarrollo de nuevos vidrios y materiales vitrocerámicos, producidos mediante el reciclaje de residuos sólidos, adquiere una importancia particular. La vitrocerámica fabricada con desechos ha demostrado su potencial para competir con productos convencionales obtenidos a partir de materias primas naturales, especialmente cuando se consideran las propiedades mecánicas y aplicaciones estructurales (Chinnam *et al.*, 2013).

3. Proceso de fabricación de vitrocerámicas

La mayoría de los vidrios inorgánicos pueden transformarse desde un estado no cristalino a un estado cristalino por un tratamiento térmico a elevada temperatura. Este proceso denominado desvitrificación, produce un material policristalino en una matriz vítrea y, por lo tanto, no es transparente (Callister, 2001). Es de resaltar, que no todos los vidrios desvitrifican, sólo algunas composiciones específicas son precursoras adecuadas para los vitrocerámicos, ya que algunos vidrios son muy estables, mientras que otros cristalizan muy rápido de manera no controlada, lo que resulta en microestructuras no deseadas (Rawlings *et al.*, 2006). Sin embargo, en algunos vidrios, esta transformación de desvitrificación puede ser controlada hasta el punto de que puede producirse un material de grano muy pequeño, el cual, esté libre de tensiones residuales sin vacíos, microgrietas u otra porosidad (Callister, 2001).

En general, la producción de las vitrocerámicas se realiza en dos pasos que involucran la obtención de un vidrio a través de la técnica de enfriamiento por fusión a altas temperaturas (1100 – 1600 °C). Posteriormente, el vidrio recocido o triturado se vuelve a calentar a una temperatura específica para que ocurra una cristalización parcial en el vidrio (Karmakar; Rademann; Stepanov, 2016; Sarrigani; Amiri, 2019). El control estricto de la composición química del vidrio original y los parámetros del proceso (velocidad de calentamiento, tratamiento térmico, tiempo de retención y velocidad de enfriamiento), son muy importantes ya que proporcionan las condiciones para la precipitación de las fases cristalinas en los vidrios y microestructura que garantizan las propiedades físicas y operativas de los materiales (Francis, 2004; Sarrigani; Amiri, 2019; Suzdal'tsev, 2002).

Para la síntesis de materiales vitrocerámicos existe una amplia variedad de métodos entre los principales se pueden señalar los siguientes: método convencional, método convencional modificado y método petrúrgico. A continuación, se describe cada uno.

3.1. Método convencional

El tratamiento térmico del vidrio sólido es la vía tradicionalmente utilizada (Callister, 2001). Es el método denominado convencional para producir vitrocerámicas mediante la desvitrificación controlada de un vidrio en dos etapas. La primera etapa es un tratamiento térmico a baja temperatura (T_N), la cual, facilita una alta velocidad de nucleación formando así una alta densidad de núcleos en todo el interior del vidrio. La segunda etapa consiste en un tratamiento térmico a altas temperaturas (T_C) para promover el crecimiento de los cristales a una velocidad razonable. En la Figura 2 se observa la dependencia de las velocidades de nucleación y crecimiento de los cristales con respecto a la temperatura (Rawlings *et al.*, 2006).

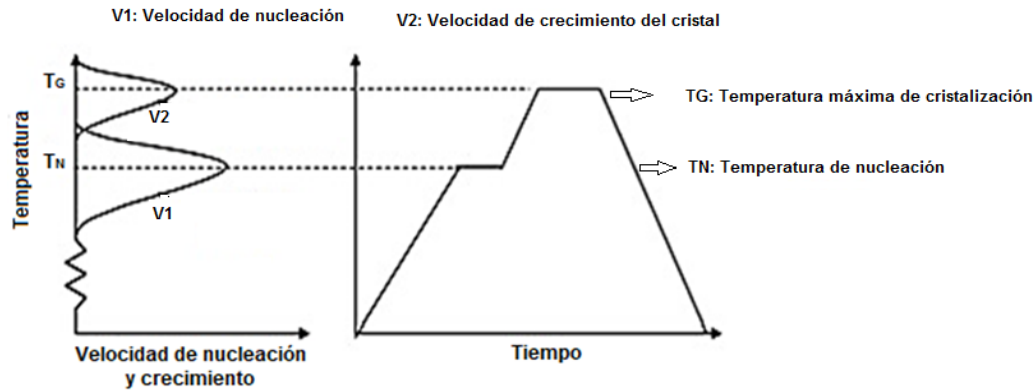


Figura 2. Cristalización de un vidrio para formar un vitrocerámico mediante el método convencional
Fuente: adaptada de Rawlings *et al.* (2006, p. 734).

La representación de la formación/no formación de fases cristalinas o núcleos en la matriz cristalina en función de la temperatura y el tiempo de tratamiento, da lugar a las denominadas curvas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación), las cuales, permiten visualizar fácilmente los intervalos de nucleación y crecimiento cristalino. Autores como Barbieri, Corradi y Lancellotti (2001) determinaron las curvas TTT en vidrios obtenidos a partir de mezclas de diferentes residuos como ceniza volante, vidrio y escoria de dolomita para encontrar los rangos de cristalización relativos, así como las curvas de desvitrificación de estos vidrios. Los diagramas se construyeron a partir de los resultados de difracción de rayos X (DRX). A partir de ello fue posible determinar la cinética de cristalización y la velocidad de enfriamiento crítica (rango de 12 ° - 42 °C/min) (Barbieri *et al.*, 2001).

3.2. Método convencional modificado

La razón del tratamiento térmico en dos etapas del vidrio es una consecuencia de la limitada superposición entre las curvas de nucleación y velocidad de crecimiento (Figura 3). Si existe una superposición extensa de las curvas de velocidad, entonces la nucleación y el crecimiento pueden tener lugar durante un tratamiento térmico de una sola etapa a temperatura T_{NG} como se indica en la Figura 3. Las curvas de velocidad, particularmente la curva de velocidad de nucleación, son sensibles a la composición y optimizando la composición de vidrio, en algunos casos, es posible obtener la superposición necesaria mediante la correcta elección de los agentes nucleantes. Esto se logró por primera vez para el sistema de vitrocerámica conocida como “Silceram” (Rawlings *et al.*, 2006).

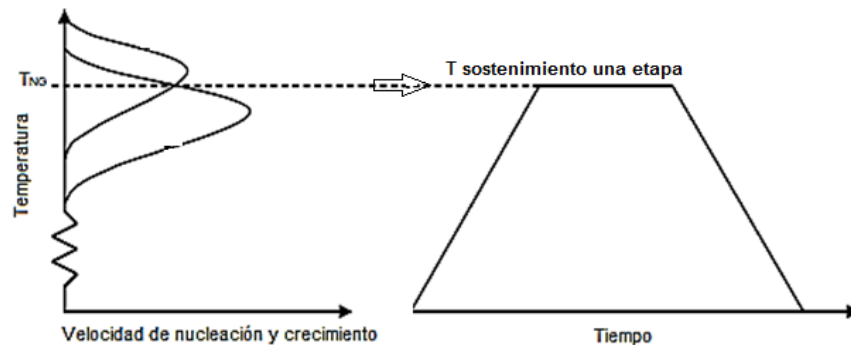


Figura 3. Cristalización de un vidrio para formar un vitrocerámico mediante el método convencional modificado (1 sola etapa)

Fuente: adaptada de Rawlings *et al.* (2006, p. 735).

3.3. Método petrúrgico

Este método consiste en el enfriamiento lento de un vidrio desde el estado fundido (*temperatura liquidus*) causando la nucleación y el crecimiento de ciertas fases cristalinas hasta temperatura ambiente (Figura 4) (Isa, 2011). La vía petrúrgica es la más comúnmente aplicada en la obtención de vitrocerámicas, a partir de materias primas naturales o residuos industriales (Rawlings *et al.*, 2006; Rincón; Romero, 1996).

De acuerdo con lo reportado por Rincón y Romero (1996), en el método petrúrgico es necesario un riguroso control de la composición química inicial, la cual, debe favorecer la obtención de fundidos en los que puedan cristalizar fases con facilidad de sustituciones isomorfas, ya que la desvitrificación va a depender de la capacidad de los constituyentes para organizarse entre sí y formar estructuras cristalinas estables. Además, se debe tener un estricto control en las velocidades de enfriamiento, ya que estas influyen en la microestructura y obtención de fases cristalinas (Francis; Rawlings; Boccaccini, 2002).

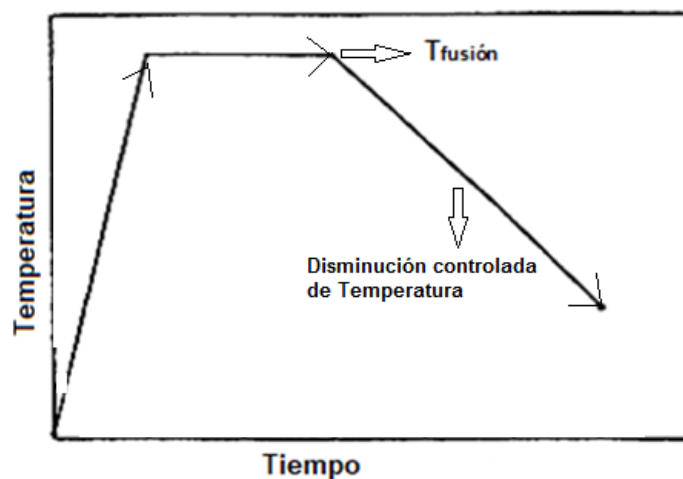


Figura 4. Método petrúrgico

Fuente: adaptada de Rincón y Romero (1996, p. 94).

La microestructura de las vitrocerámicas fabricadas a partir de 100 % de ceniza volante difiere significativamente al variar la velocidad de enfriamiento. A 1 °C/min presentan una fase cristalina dendrítica (fase hematita) distribuida en la matriz multifásica, mientras que en las muestras enfriadas a 10 °C/min, se ha evidenciado una morfología de los cristales tipo listones. La morfología de la fase cristalina resultante de la adición de 40 % en peso de vidrio a un velocidad de enfriamiento de 1 °C/min, se caracterizó por una red dendrítica, que se atribuyó a la fase plagioclasa, mientras que la muestra con un 40 % en peso de vidrio enfriada a 10 °C/min tiene una estructura en forma de fibra dispersa que se asocia a la fase magnetita, ya que la rápida velocidad de enfriamiento de 10 °C/min, no permitió el tiempo suficiente para que los átomos de hierro se reorganizaran y alcanzarán el grado de orden de cristalización que facilitan la formación de augita y plagioclasa. Sin embargo, Francis, Rawlings y Boccaccini (2002) reportan que velocidades de enfriamiento más rápidas (10 °C/min) favorece la cristalización de la fase magnetita y, en consecuencia, las muestras presentan propiedades magnéticas.

De acuerdo a Francis, Rawlings y Boccaccini (2002), el método petrúrgico representa una ruta simple y económica para la obtención de vitrocerámicas, a partir de residuos de silicato con altos contenidos de hierro. Tanto el método convencional modificado (una sola etapa) como el método petrúrgico son más económicos en comparación con el método convencional que involucra dos etapas.

3.4. Sinterización y cristalización de polvos vítreos

Consiste en la conformación por compactación en frío de un polvo, seguido de un tratamiento térmico a alta temperatura para sinterizar el compacto. Los polvos se densifican a temperaturas relativamente bajas aprovechando un mecanismo de sinterización de flujo viscoso; después de la densificación, el material se somete a un tratamiento térmico de cristalización para obtener la microestructura de vitrocerámica requerida. Tanto la densificación como la cristalización pueden tener lugar durante un solo paso de sinterización (Isa, 2011).

Las fases presentes y la microestructura final del material vitrocerámico, son una función del método o ruta de obtención seleccionada, de ahí la importancia de seleccionar el método que más se adapte al alcance de la investigación y/o recursos presentes. En cada uno de los procesos de obtención de vitrocerámicas mencionados con anterioridad, se pueden obtener materiales desde transparentes hasta opacos y en una gran variedad de colores dependiendo de las materias primas empleadas, los cuales, con un diseño adecuado de composición y microestructura, pueden tener numerosas aplicaciones en el campo doméstico, industrial y arquitectónico (Rincón; Romero, 1996).

4. Vitrocerámicas obtenidas a partir de residuos

El reciclaje de residuos sólidos mediante la aplicación de tecnologías modernas representa una opción eficaz para utilizar con seguridad los materiales desechados. El procesamiento de materiales secundarios usualmente requiere menos energía y produce menos contaminación que la producción de cantidades equivalentes de materias primas naturales (Chinnam *et al.*, 2013). De acuerdo con lo reportado por Silva, de Brito, Lynn y Dhir (2019), se estimó en el 2012 una producción mundial de residuos sólidos municipales de aproximadamente 1.300 millones de toneladas y se espera que aumente a 2.200 millones de toneladas para 2025. Estos residuos sólidos incluyen una amplia gama de componentes: alimentos, plásticos, papel, metales, vidrio y textiles, cuya cantidad varía de acuerdo con las prácticas de las diferentes culturas, políticas y legislación sobre el manejo de los desechos y, en general, sectores económicos de diferentes regiones (Silva *et al.*, 2019).

El proceso de vitrificación y desvitrificación de vitrocerámicas permite neutralizar diferentes desechos industriales potencialmente peligrosos y, además, estabilizar y reducir el volumen de desechos entre un 20 % y un 97 % dependiendo de su naturaleza, obteniendo de esta manera un valor agregado de los desechos (Dávalos; Bonilla; Villaquirán-Cacedo; Mejía de Gutiérrez, 2020). Aunque el diseño de materiales vitrocerámicos mediante residuos industriales, en particular a partir de escorias, se desarrolló en los años 60's en la antigua Unión Soviética por parte de Kitaigorodski y Pavlushkin (Karamanov, 2009), algunas de estas vitrocerámicas se han convertido en productos comerciales como el Slagsitall (desvitrificado en forma de cristales de wollastonita y anortita), Slageram, Slagkyston o en productos preindustriales como el Silceram (desvitrificado en piroxeno) (Karamanov, 2009).

Al utilizar desechos industriales como materia prima para la obtención de vitrocerámicas, el proceso se justifica económicamente solo si se obtienen materiales con valor comercial (Karamanov, 2009). Al incorporar residuos sólidos en las formulaciones iniciales de los productos cerámicos, debido a la heterogeneidad de los mismos, es importante adaptar los residuos a la producción de vidrios precursores de materiales vitrocerámicos mediante el control estricto de la composición química, logrando que cada residuo contribuya con una cantidad apropiada de diferentes óxidos, porque las mezclas deben contener los componentes típicos como: formadores de la red vítrea (SiO_2 , Al_2O_3 ...), elementos modificadores (Na_2O , K_2O ...) y estabilizadores (CaO , MgO , ZnO , PbO ...) que dan lugar a la formación de vidrios estables (Barbieri *et al.*, 2001; Montoya-Quesada; Villaquirán-Cacedo; Mejía de Gutiérrez, 2019). Aunque la versatilidad del proceso de producción de materiales vitrocerámicos a partir de residuos industriales ha sido reportada en diferentes investigaciones, es de destacar el uso de escorias (Ayala; Gómez; Roether; Boccacini, 2019; Francis, 2004; Mihailova; Djambazki; Mehandjiev, 2011; Wang; Ni; Jia; Zhu; Huang, 2010; Yang *et al.*, 2014), ceniza de carbón (Barbieri *et al.*, 2001; Leroy *et al.*, 2001; Francis *et al.*,

2002; Cheng; Ueng; Chen; Chiu, 2002; Luan; Li; Su; Cui, 2010; Hieu; Wang; Chen; Xuan; Hoang, 2012; Montoya-Quesada *et al.*, 2019), residuos de vidrio (Kalirajan; Ranjeeth; Vinothan; Vidyavathy; Srinivasan, 2016), residuos de bagazo de caña (Teixeira *et al.*, 2014), residuos de cobre (Yang *et al.*, 2014) e inclusive mezclas de diferentes residuos (Barbieri *et al.*, 1999; Barbieri *et al.*, 2000; Francis; Rawlings; Sweeney; Boccaccin, 2004; Yoon; Yun, 2008; Cedillo, 2010; Ljati; Kamusheva; Grozdanov; Paunovi; Karamanov, 2015). En general, estos estudios reportan propiedades similares o incluso superiores a los obtenidos en vitrocerámicas convencionales.

En la presente revisión se abordarán principalmente las vitrocerámicas obtenidas a partir de ceniza de carbón, escoria y residuo de vidrio; debido a los altos volúmenes generados de estos materiales en Colombia, que los hace residuos potencialmente aptos para su aplicación en procesos industriales y particularmente en la producción de vitrocerámicas densas. Se estima que el 40 % de la energía generada en el mundo es procedente de la quema de carbón, lo cual equivale a 7.700 millones de toneladas de este mineral consumido anualmente (World Energy Council, 2016). De acuerdo con lo reportado por Mejía, Rodríguez y Mejía De Gutiérrez (2014), en Colombia, las termoeléctricas más importantes (e.g., Termozipa, Termopaipa y Termosochagota) generan alrededor de 600 kt/año de residuos procedentes de la quema de carbón mineral más conocido como ceniza volante, un subproducto rico en sílice y alúmina. Por otra parte, en el año 2012, se estimó una producción de aceros en Colombia de 1,3 millones de toneladas (Sánchez, 2014) y de acuerdo con Rondón *et al.* (2018), por cada tonelada de acero producida aproximadamente alrededor del 20 % en peso, corresponde a subproductos como escoria siderúrgica y en el mundo se estima que son producidas anualmente 250 toneladas de escoria siderúrgica (Zeynel, 2018). Las cantidades mostradas anteriormente indican que la producción de escorias es importante, y este residuo se caracteriza principalmente por poseer altos contenidos de óxido de calcio (Sánchez, 2014). El residuo de vidrio por su parte, es un material 100 % reciclable rico en sílice y con cantidades considerables de Na₂O (material ampliamente conocido como fundente), del cual estadísticamente no hay información clara sobre la cantidad total de residuos producidos en el mundo, pero se estima que el 7 % de los residuos sólidos urbanos corresponden a desechos de vidrio (Jani; Hogland, 2014).

4.1. Producción de vitrocerámicas basadas en cenizas

En la literatura se encuentran resultados con diferentes tipos de cenizas, entre las cuales se encuentran las cenizas de carbón, cenizas de diferentes residuos agrícolas y cenizas de residuos municipales. A continuación, se describen los principales hallazgos.

La ceniza volante es un subproducto de las calderas industriales a base de carbón de centrales eléctricas y centrales térmicas. Las composiciones elementales de las cenizas volantes varían según el tipo de carbón, el grado de pulverización y el tipo de colectores utilizados, incluso cuando las cenizas volantes se obtienen de la misma fuente (Ayala *et al.*, 2019). De acuerdo con lo reportado por Liu, Yang y Zhang (2019), las cenizas volantes y las cenizas de fondo representan del 20 % al 30 % del peso total durante el proceso de incineración. La principal diferencia entre las cenizas volantes y las cenizas de fondo es el menor contenido residual de carbono en las primeras, una proporción mayor de partículas esféricas, finas y con una distribución de tamaño de partícula más estrecha (Benavidez; Grasselli; Quaranta, 2003). Estos residuos, especialmente las cenizas volantes, contienen una cantidad considerable de sales, metales pesados lixiviables y compuestos orgánicos tóxicos (Liu *et al.*, 2019). Adicionalmente, son materiales que contienen altos contenidos de sílice (Isa, 2011) y, en ocasiones, alto contenido de óxido de hierro, lo cual les permite ser residuos potenciales para desarrollar vitrocerámicas con fases magnéticas bajo un procesamiento adecuado (Chinnam *et al.*, 2013).

DeGuire y Risbud (1984) comenzaron a usar cenizas volantes de carbón de Illinois como materia prima para la preparación de vitrocerámicas mediante el método convencional. En artículos reportados por autores como Francis, Rawlings, Sweeney y Boccaccini (2002); Kalirajan *et al.* (2016); Lu *et al.* (2014), la ceniza volante utilizada para la fabricación de vitrocerámicas generalmente es calcinada a 800 °C durante 2 h para eliminar cualquier compuesto volátil, incluidos azufre y carbono, y, en ocasiones, es necesario adicionar otros residuos

u otros óxidos sintéticos para mejorar las condiciones de fusión y la estabilidad del vidrio obtenido. En un estudio reportado por Romero y Rincón (2000), se sintetizaron vitrocerámicas a partir de cenizas volantes de centrales térmicas y, debido a la baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y bajo contenido en CaO y MgO que generalmente presentaba esta ceniza, se adicionó residuo de vidrio y dolomita (desechos de la extracción de minerales de zinc) compensando de esta manera el déficit en estos compuestos. Por otra parte, Barbieri, Manfredini, Queralt, Rincon y Romero (1997) mezclaron cenizas volantes con dolomita flotante para obtener vidrios amorfos a 1.550 °C y con la posterior recristalización de este vidrio fueron obtenidos materiales parcialmente cristalizados. Tanto los vidrios originales como la vitrocerámica mostraron mejores propiedades térmicas y mecánicas que los vidrios convencionales y/o vitrocerámica comercial.

El estudio reportado por Barbieri *et al.* (2000), demuestra la posibilidad de vitrificar y desvitrificar hasta un 40-50 % en peso de cenizas volantes mezcladas con vidrio reciclado y dolomita, haciendo que el tratamiento de vitrificación sea un procedimiento de eliminación adecuado de estos desechos. Estos autores reportan la obtención de fases cristalinas como dióxido, augita, albita, anortita y espinela de hierro. Por su parte, Francis *et al.* (2002) mostraron que mezclas que contienen ceniza y vidrio en una proporción de 50/50 y sinterizadas a 1500 °C durante 5 horas, presentan los mejores resultados en términos de densificación y desarrollo de la microestructura. Además, estas muestras exhibieron propiedades magnéticas que se relacionaron con la presencia de una fase tipo ferrita.

Erol, Küçükbayrak y Ersoy-Meriçboyu (2007), vitrificaron tres cenizas volantes de diferente procedencia sin ningún aditivo. La fase amorfa desapareció y se produjo una fase cristalina dióxido en las muestras tratadas térmicamente. Las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las muestras de vidrio tratadas térmicamente son mejores que las originales de las muestras de vidrio; pero tanto el vidrio como la vitrocerámica obtenida presentaron propiedades deseables para su uso industrial.

Hieu *et al.* (2012) encontraron que el tiempo de enfriamiento y las proporciones de los materiales iniciales son factores dominantes en el control de la cristalización, microestructura, características químicas y físicas de la vitrocerámica final. En su estudio determinaron las condiciones experimentales óptimas para la obtención de vitrocerámicas por el método petrórgico utilizando una mezcla de 80 % en peso de ceniza de fondo de carbón y 20 % de ceniza volante a una temperatura de fusión de 950 °C y velocidad de calentamiento de 10 °C/min, con un tiempo de enfriamiento de 1 hora. Los principales minerales que se formaron en la vitrocerámica fueron gehlenita, akermanita y wollastonita, por lo que la vitrocerámica obtenida pudo ser considerada apta para aplicaciones en el sector de construcción.

Zeng, Sun, Peng y Zheng (2019) evaluaron el efecto del tamaño de partícula de la ceniza volante en la sinterización y las propiedades de las vitrocerámicas, observando que las propiedades de absorción de agua, resistencia a la flexión y resistencia química de la vitrocerámica, mejoraron con la disminución del tamaño de partícula y alcanzaron los estándares de los materiales de decoración arquitectónica. Las principales fases cristalinas de las vitrocerámicas preparadas fueron anortita, cuarzo y mullita, a lo cual se atribuyó la buena resistencia a ácidos y álcalis a temperatura ambiente.

Chen *et al.* (2019) evaluaron la incorporación de La_2O_3 sobre la microestructura y propiedades de vitrocerámicas $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ obtenidas a partir de ceniza volante. Las muestras con 2 % La_2O_3 presentaron las mejores propiedades mecánicas (resistencia a la flexión de 238 MPa y dureza Vickers 7,57 GPa) y durabilidad química (resistencia a ácidos y álcalis de 97,5 % y 98,9 %, respectivamente).

Montoya-Quesada *et al.* (2019) evaluaron el empleo de ceniza volante, escoria siderúrgica y vidrio en una mezcla estándar con relación molar CaO/SiO_2 de 0,36 variando el contenido de ZnO como agente fluidizante entre el 4-10 % en peso. Los materiales fueron obtenidos mediante el método de sinterización, la temperatura para su cristalización fue encontrada a partir de las curvas DSC para cada muestra. Los materiales vitrocerámicos obtenidos presentan como fases principales anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{Na (AlSi}_3\text{O}_8)$). La incorporación del

agente fluidizante en porcentaje superior al 7 % induce la cristalización de fases de hardystonita ($\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$) y willemite (Zn_2SiO_4). Estas vitrocerámicas presentaron buena durabilidad a álcalis con pérdidas inferiores al 1,5 % en peso.

Dávalos *et al.* (2020) estudiaron la producción de vitrocerámicas a partir de mezclas de cenizas volantes, con ceniza de cascarilla de arroz y cal viva. Evaluaron relaciones molares CaO/SiO_2 entre 0,25 – 0,39 encontrando que, vitrocerámicas con densidades entre 2.607–2.739 kg/m^3 pueden ser satisfactoriamente producidas a partir de residuos. Además, las vitrocerámicas presentaron buenas propiedades mecánicas: durezas vickers de 600 MPa y módulo de elasticidad de 96 GPa, con una tenacidad a la fractura de entre 0,39 – 0,59 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Adicionalmente, los materiales presentaron buena durabilidad química, al presentar una pérdida en masa no superior al 0,5 mg/cm^2 , haciéndolas buenas candidatas para aplicaciones en sector de la construcción.

Lee *et al.* (2017) Implementaron la utilización de ceniza de cascarilla de arroz blanca (RHA) tratada térmicamente a 1000 °C por 2 horas como fuente de sílice para obtener materiales vitrocerámicos en el sistema $\text{ZnO}-\text{SiO}_2$, ya que este sistema de vidrio tiene una gran variedad de aplicaciones por su alto nivel de inercia química y también da varias tonalidades que pueden usarse en los paneles de visualización de plasma (PDP) y fósforo de rayos catódicos. El análisis de difracción de rayos X de la ceniza tratada muestra la fase cristobalita, sin embargo, en el sistema $(\text{ZnO})_x$ (WRHA) 1-x ($x=0,55, 0,60, 0,65$ y $0,70$ % en peso) las muestras con $x=0,55$ presentaron una fase amorfa mientras que las muestras restantes presentaron la fase $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$. Los resultados evidenciaron un aumento en la brecha de banda óptica (E_{opt}) debido a la transición prohibida directa. Por lo tanto, la E_{opt} del sistema disminuye de 4,50 a 4,41 eV en orden creciente de ZnO y la disminución es causada por la naturaleza covalente del enlace Zn-O.

Khaidir *et al.* (2019) investigaron la fotoluminiscencia y propiedades ópticas de vidrios y vitrocerámicas de silicato de zinc dopado con europio ($\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$) derivado de cenizas de cáscara de arroz blanco como fuente potencial de sílice mediante el método de sinterización. El análisis difracción de rayos X (XRD) reveló la formación de fases amorfas, α o $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$ en las muestras de vidrio y vitrocerámica. Los resultados muestran que los valores de separación de la banda óptica para muestras no dopadas aumentan de 2,97 eV a 3,39 eV.

4.2. Producción de vitrocerámicas basadas en escorias

Las escorias son un tipo de residuo sólido generado por la industria metalúrgica, entre estas se encuentran reportes de la producción de vitrocerámicas empleando escoria siderúrgica de alto horno y escorias de diferentes procesos metalúrgicos como cobre, titanio, fosforo, plomo.

La escoria de alto horno se caracteriza por sus altos contenidos en CaO , SiO_2 , MgO y Al_2O_3 (Jia *et al.*, 2019). La escoria de alto horno fue el primer residuo de silicato que se investigó a fondo como materia prima para la obtención de vitrocerámica (Rawlings *et al.*, 2006). El primer intento de comercializar una vitrocerámica a partir de escoria fue realizado por British Iron and Steel Research Association a finales de la década de 1960, con el nombre de Slagceram, la cual fue producida mediante el método convencional de tratamiento térmico de dos etapas (Rawlings *et al.*, 2006; Sarrigani; Amiri, 2019). Un material similar, “Slagsitall”, se desarrolló en la antigua Unión Soviética aproximadamente al mismo tiempo (Isa, 2011). Debido a la composición química de la escoria de alto horno (amorfa y rica en Ca), varios estudios demuestran la viabilidad de sintetizar vitrocerámicas con una proporción > 90 % en peso de este residuo (Barbieri *et al.*, 2000; Erkmen; Çataklı; Öveçoğlu, 2009; Francis, 2004; Öveçoğlu, 1998).

La escoria de acero, el principal desecho sólido metalúrgico, es más difícil de utilizar debido a su pobre molienda e inestabilidad de volumen, que se caracteriza por una gran cantidad de óxidos de hierro y CaO/MgO . Sin embargo, bajo la acción de un modificador o activador químico, por ejemplo, cenizas volantes,

arena de cuarzo, Na_2SiO_3 , entre otros, la escoria de acero se convierte en un buen candidato para su uso en vitrocerámicas y cemento (Liu *et al.*, 2015). De acuerdo con lo reportado por Liu *et al.* (2015), es posible ajustar la composición de una escoria mediante reducción térmica de carbono para reducir los óxidos de hierro en la escoria fundida, implementando además modificadores como cenizas volantes o relaves, que contienen sílice y alúmina para reducir la viscosidad y la basicidad de la vitrocerámica. Después del proceso de fusión y temple de la mezcla, se separa magnéticamente el hierro sólido de la frita, debido a la generación de magnetita cuando el hierro fundido y reducido reacciona con el agua en condiciones de alta temperatura. Posteriormente, la frita se convierte en vitrocerámica mediante un posterior tratamiento térmico del polvo. Durante el proceso de reducción, el estado de ocurrencia de hierro en la escoria se debe controlar de acuerdo con los requisitos de la cerámica de vidrio. Por lo general, Fe^{3+} por debajo del 3 % en peso o Fe^{2+} por debajo del 4,5 % en peso en vitrocerámica tendría un efecto favorable en sus propiedades (Liu *et al.*, 2015).

En algunos casos es necesario implementar agentes nucleantes para favorecer la cristalización en las muestras. Das *et al.* (2012) desarrollaron vitrocerámicas a partir de escoria de alto horno y evaluaron el efecto de tres agentes nucleantes por separado TiO_2 , ZrO_2 y P_2O_5 en una proporción del 4 % en peso. Los resultados evidenciaron que la escoria de alto horno se puede convertir en vitrocerámica utilizando agentes nucleantes, siendo la gehlenita la fase cristalina principal detectada en la muestra de vitrocerámica con P_2O_5 como agente nucleante y sin ningún aditivo (muestra 100 % escoria), mientras que la melilita es la fase cristalina principal en la muestra de vitrocerámica con TiO_2 , ZrO_2 .

La escoria de cobre se caracteriza por su contenido en SiO_2 y un alto contenido de hierro, principalmente en forma de material no magnético, de ahí que su uso para la obtención de vitrocerámicas esté tan limitada por su bajo contenido en agentes formadores de redes de vidrio, siendo necesario mezclarla con otras materias primas o residuos para obtener un vidrio con propiedades adecuadas o reducir el contenido de hierro en la escoria (Çoruh; Ergun; Cheng 2006; Yang *et al.*, 2013).

Çoruh *et al.* (2006) y Karamanov, Aloisi y Pelino (2007), disminuyeron con éxito el contenido de hierro en este tipo de escoria mediante un tratamiento térmico y lograron producir vitrocerámicas al mezclar la escoria de cobre con otros desechos industriales o arena; pero esto resultó en una baja tasa de utilización de la escoria de cobre en el vidrio o en la producción de la vitrocerámica. Yang *et al.* (2013) sintetizaron vitrocerámicas a partir de escoria de cobre, pero debido al alto contenido de hierro 41,55 % en peso, optaron por separarlo durante el proceso de fusión de la mezcla. Para ello, incorporaron coque durante el proceso de fusión y los iones de hierro se redujeron, posteriormente la masa fundida se dividió en dos capas con el hierro reducido fundido en la parte inferior y la escoria fundida sin hierro (vidrio fundido) en la parte superior, logrando de esta manera transformar la escoria residual en vitrocerámicas de color claro.

La escoria de plomo posee como componentes principales SiO_2 , CaO y Fe_2O_3 , que pueden usarse como materias primas para vitrocerámica al agregar ciertos compuestos, debido a que la vitrocerámica tiene un buen efecto en la inmovilización de los elementos tóxicos en la escoria de plomo, el valor agregado del producto aumenta (Pan *et al.*, 2019). Pan, Zhang, Bao, Guo y Liu (2015) patentaron un método para la obtención de vitrocerámica de Hedenbergita, a partir de escoria de plomo como materia prima principal junto con residuos de vidrio y cenizas volantes. La vitrocerámica se preparó en diferentes colores mediante la adición de diferentes colorantes y cumplió con el estándar de la vitrocerámica industrial, además, las pruebas de toxicidad demostraron una alta inmovilización de los elementos tóxicos.

Wang y Liang (2007) usaron escoria de titanio, ceniza volante y MgCO_3 obteniendo en la vitrocerámica producida como fase principal cordierita. El coeficiente de expansión térmica de la vitrocerámica $(25 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ resultó un poco más alta que la de la vitrocerámica a base de cordierita pura $(20 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. La radiación infrarroja y el coeficiente de expansión térmica de este material demuestran que el material vitrocerámico tiene potencial para su aplicación en una amplia gama de materiales infrarrojos de calentamiento y secado.

Cao y Wang (2013) utilizaron 62 % de escoria de fósforo como materia prima principal para la obtención de vitrocerámicas e incorporaron óxido de sodio, arena de cuarzo, magnesita y óxido de zinc. El mecanismo de cristalización de los vidrios se vio afectado principalmente por el aumento en el contenido de Na_2O , pasando de una cristalización superficial a cristalización en masa. Las fases cristalinas predominantes en ambos vidrios fueron β - CaSiO_3 y $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$; sin embargo, a $T \geq 1250^\circ\text{C}$ la fase $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$ desaparece y aparece α - CaSiO_3 en el vidrio con 15 % de Na_2O .

Yang *et al.* (2014) evaluaron el efecto de la relación CaO/SiO_2 sobre la cristalización de vitrocerámicas obtenidas a partir de escoria de cobre y aditivos de alta pureza, utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC), difracción de rayos X (XRD), espectroscopia infrarroja (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM). El resultado de la cinética de cristalización muestra un aumento en las energías de activación de la cristalización con un aumento en la relación CaO/SiO_2 hasta 0,38 y, posteriormente, una disminución con un aumento adicional en la relación CaO/SiO_2 hasta 0,42. En general, en todas las muestras vitrocerámicas con diferentes proporciones de CaO/SiO_2 las fases principales fueron anortita y diópsido, sin embargo, las mejores propiedades integrales de la vitrocerámica se obtuvieron para una relación CaO/SiO_2 de 0,42: baja porosidad (0,11 %), alta densidad ($2,75 \text{ g/cm}^3$) y alta dureza (85,75 HBa). Los colores de las vitrocerámicas resultantes varían de gris claro a amarillo.

De otra parte, Jia *et al.*, (2019) evaluaron el efecto de la relación SiO_2/CaO sobre la viscosidad, la estructura y las propiedades mecánicas de vitrocerámicas obtenidas a partir de escoria de alto horno utilizando óxidos de grado analítico: CaO , MgO y Al_2O_3 , arena de cuarzo y 1,5 % de Cr_2O_3 como agente nucleante. Los resultados indicaron que al disminuir la relación SiO_2/CaO , la viscosidad y el grado de polimerización del vidrio fundido disminuyen significativamente y, por lo tanto, en la cristalización de las muestras se obtienen diferentes fases cristalinas. Muestras con una mayor relación SiO_2/CaO (1,67-2,27) evidenciaron diópsido como fase cristalina principal, para las muestras con una relación SiO_2/CaO de 1,44 predomina la augita, mientras que con una relación SiO_2/CaO de 1,25 predominan la augita y gehlenita. A su vez, al disminuir la relación SiO_2/CaO , las densidades de las vitrocerámicas aumentan considerablemente, mientras que la resistencia a la flexión disminuye. La muestra con SiO_2/CaO de 2,27 exhibió el mejor desempeño integral: resistencia a la flexión de 182,9 MPa, microdureza de 7,34 GPa, resistencia en ácido sulfúrico al 20 % en peso del 95,21 % y resistencia a los álcalis del 98,43 %. Así, la vitrocerámica preparada puede utilizarse como material de revestimiento en tuberías de industrias químicas, fábricas de cemento e industrias de energía eléctrica.

Igualmente se ha reportado que es posible obtener vitrocerámicas derivadas de escoria con Fe_2O_3 que presenten propiedades fotocatalíticas para descomponer el colorante azul de metileno bajo luz visible e irradiación de luz solar. De acuerdo con un estudio realizado por Ali *et al.* (2019a), una mezcla de escoria con Fe_2O_3 en proporciones de 11, 30 y 5,0 % en masa permite obtener vitrocerámicas con actividad fotocatalítica, la cantidad precipitada de hematita aumenta con el porcentaje de Fe_2O_3 . En el mismo año, el mismo autor Ali *et al.* (2019b) investigó el efecto fotocatalítico activado por luz visible de vitrocerámicas de escoria de desechos domésticos simulados con diferentes proporciones de Fe_2O_3 , luego de tratamiento térmico a 900°C durante 100 min. La razón de la alta fotoactividad de esta muestra fue asociada a la presencia de nanopartículas de componentes magnéticos como CaFe_2O_4 y α - Fe_2O_3 , que son esenciales para exhibir un efecto catalítico activado por luz visible.

4.3. Producción de vitrocerámicas basadas en residuos de vidrio

La industria del vidrio presenta un alto grado de reciclabilidad de su producto. El vidrio triturado de los contenedores posteriores al consumo (es decir, botellas y frascos) y los desechos de vidrio plano pueden reciclarse repetidamente en productos similares, prácticamente sin pérdida de pureza o calidad (Silva; de Brito; Lynn; Dhir, 2017). Siendo el vidrio sódico-cálcico el tipo de vidrio más reconocido, dado que se utiliza en

cristales de ventanas, recipientes de vidrio (botellas y frascos) para bebidas y alimentos, y algunos artículos básicos. La composición mayoritaria de este vidrio es óxidos de silicio (hasta 75 % en peso), óxidos de calcio y óxidos de sodio (Sarrigani; Amiri, 2019).

Autores como Pelino, Cantalini y Rincón (1997) sintetizaron vitrocerámicas a partir de residuos de vidrio, residuos de granito y goethita (Fe-O-OH). El alto contenido de hierro de la goethita en el vidrio favoreció la rápida formación de una gran cantidad de núcleos de magnetita. Las composiciones de vidrio con un contenido de Fe_2O_3 entre 25 % y 30 % y un contenido de alúmina superior al 3 % favorecieron la cristalización durante el vertido de la masa fundida; por su parte, las vitrocerámicas presentaron una tenacidad a la fractura (K_{Ic}) de $1,78 \text{ MPam}^{1/2}$. Romero, Rincón González, Ovidio y Esparza (2001) también sintetizaron vitrocerámicas a partir de goethita (Fe-O-OH) dolomita y vidrio sódico cálcico, que también presentaban altos contenidos de Fe_2O_3 entre 15-29 % en peso, por lo que evaluaron las propiedades magnéticas y encontraron que con un bajo contenido de Fe_2O_3 , se presenta un comportamiento paramagnético, mientras que, a concentraciones más altas, un comportamiento ferromagnético. Por encima del 18 %, se presenta un comportamiento mixto, los cúmulos magnéticos precipitados contribuyen a una respuesta superparamagnética, mientras que los átomos de Fe disueltos se comportan paramagnéticamente y contribuyen a la magnetización a campos magnéticos muy elevados.

Francis *et al.* (2004) sintetizaron vitrocerámicas a partir de una mezcla de vidrio sódico cálcico (20 – 60 % en peso) y ceniza volante rica en hierro, encontrando que la formación de plagioclasa aumenta con el contenido del vidrio, sin embargo, el pico de magnetita disminuye en intensidad. A velocidades de enfriamiento rápido ($10 \text{ }^\circ\text{C/min}$) no se alcanza el grado de orden de cristalización que producía las fases de augita y plagioclasa, tal como fue observado a la velocidad de enfriamiento lenta ($1 \text{ }^\circ\text{C/min}$). Por lo tanto, fue confirmado que la velocidad de enfriamiento y la cantidad de vidrio sódico-cálcico añadido, son factores dominantes en el control de la cristalización y la microestructura de las vitrocerámicas ricas en hierro.

Romero, Kovacova y Rincón (2008) evaluaron este efecto en vitrocerámicas a partir de 60 % residuo de vidrio, 30 % de residuo de lixiviación de Níquel y 10 % de dolomita. Estos autores encuentran que, el modo de cristalización y la dimensionalidad de los cristales dependen fuertemente del tamaño de partícula del vidrio, siendo $100 \text{ }\mu\text{m}$ el tamaño crítico, ya que si el tamaño de partícula es superior, hay un crecimiento tridimensional del cristal controlado por difusión, mientras que, si es menor el mecanismo de reacción, se da en la interfaz con crecimiento bidimensional de cristales.

Bernardo, Pontikes y Angelopoulos (2012), evaluaron la incorporación de diferentes tipos de vidrios sódico-cálcico y borosilicato, mezclados con ceniza volante y escoria metalúrgica para obtener vitrocerámicas. Los autores reportan que las vitrocerámicas que contienen residuo de vidrio de borosilicato muestran una mayor resistencia a la flexión en comparación con las vitrocerámicas producidas con residuos de vidrio sódico-cálcico. Por otra parte, Hanpongpan, Jiemsirilers, Thavorniti (2007) prepararon vitrocerámicas mezclando residuos de la hidrometalurgia de zinc con dos tipos de vidrio: vidrio transparente y ámbar mediante el método de sinterización en polvo; a pesar de que los dos vidrios utilizados eran de naturaleza sódico-cálcica se evidenció un efecto diferente en la resistencia a la flexión lo cual atribuyen a la diferencia en composición química.

Chen-Shiuan y Kung-Cheh (2013) evaluaron el uso de desechos de vidrio de pantalla de cristal líquido, lodos de fluoruro de calcio como fundente y MgO como agente modificante, y reportan que al aumentar el contenido de MgO los vidrios exhiben temperaturas de cristalización más bajas y la densificación se ve considerablemente obstaculizada por el inicio de la cristalización, dando como resultado una disminución en la densidad aparente y la resistencia a la flexión. Sugieren que estos materiales pueden usarse como materia prima para producir cerámica de vidrio aislante.

Ponsot *et al.* (2014) sintetizaron vitrocerámicas a partir de una mezcla de vidrio de borosilicato y escorias metalúrgicas en proporciones de 75:25 y 50:50 utilizando el método de sinterización en polvo. Los resultados

evidenciaron que el vidrio de borosilicato no solo encapsuló las escorias en una matriz de vidrio sino que promovió transformaciones de fase ricas en Fe. Las muestras con una proporción 50:50 presentaron un aumento en la densidad y disminución en la porosidad.

Vitrocerámicas de wollastonita fueron preparadas por Lu *et al.* (2014), a partir de una mezcla de residuos de vidrio (60 % en peso) y cenizas volantes (30 %), con adición de cal utilizando el método de sinterización en polvo. Los autores investigaron el efecto del tamaño de partícula de las materias primas en el proceso de sinterización, la cinética de cristalización y las propiedades mecánicas de la vitrocerámica, encontrando que las vitrocerámicas sinterizadas a partir de polvos finos (6 mm) presentaron velocidad de sinterización rápida, alta densidad aparente y energía de activación de sinterización reducida. La resistencia a la flexión de las vitrocerámicas de wollastonita a partir de polvos finos se incrementó en más del 50% en comparación con las de polvos gruesos, como resultado de la mayor densificación y el alto grado de cristalinidad.

Kalirajan *et al.* (2016) evaluaron el efecto del MgO en una proporción del 5 – 25 % en peso sobre vitrocerámicas producidas por el método de sinterización en polvo a partir de residuo de vidrio (70 % en peso) y ceniza volante (30 % en peso). Las fases cristalinas presentes en la vitrocerámica fueron piroxeno y forsterita. Los autores reportan que, al aumentar el contenido de magnesita, aumentó la temperatura de cristalización de las muestras (T_p) y la resistencia a la flexión, sin embargo, a valores superiores al 10 % de MgO, la resistencia empezó a disminuir. La resistencia máxima fue de 78 MPa a 10 % de MgO, muy superior a la de la porcelana tradicional (35 MPa). El proceso de sinterización simple y la relativamente alta resistencia de la vitrocerámica, le garantizan una posible aplicación en baldosas de construcción.

Silva *et al.* (2017) encontraron que al incorporar residuo de vidrio para la obtención de materiales vitrocerámicos, se consigue una mayor densificación de la matriz, lo que se asocia al aumento de las cantidades de Na_2O y CaO aportadas por el vidrio y la consiguiente disminución del Al_2O_3 . Esto da lugar a la formación de una fase de vidrio con menor viscosidad capaz de llenar los poros más fácilmente, causando la mayor cristalización, disminución de la porosidad y un mejor desempeño mecánico.

Un estudio sobre el efecto de la temperatura de sinterización en el material físico y estructural de vitrocerámicas de fluoruro de silicato de aluminio (ASF) fue llevado a cabo por Wan *et al.* (2019), a partir de concha de almeja (CS) y vidrio sódico cálcico a través de la técnica convencional de enfriamiento por fusión. El alto contenido de Ca y Si del vidrio y la concha de almeja promueve la producción de la composición de vitrocerámicas ASF. La densidad y la contracción lineal de las muestras variaron con la temperatura de sinterización. Además, los resultados de XRD mostraron que la fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) es la fase principal en todas las muestras, lo que las hace un excelente candidato para aplicaciones dentales.

Ayala *et al.* (2019) sintetizaron vitrocerámicas por el método convencional utilizando tres mezclas con diferentes proporciones de escoria (GBFS), ceniza volante (FA) y residuo de vidrio (G): M1: 10 % GBFS 20 % FA y 70 % G, M2: 10 % GBFS, 35 % FA y 55 % G, M3: 55 % GBFS, 35 % FA y 10 % G. Las fases cristalinas principales resultantes fueron dióxido y anortita, con una pequeña cantidad de enstatita y gehlenita. Los resultados de resistencia a la fractura fueron inferiores a 10,8 MPa, lo que representa una limitación para aplicaciones estructurales.

Savvilitidou, Kritikaki, Stratakis, Komnitsas y Gidaracos (2019) prepararon mezclas con desecho de vidrio fotovoltaico (G) y cenizas volantes (FA) en las siguientes proporciones: 70 % G+ 30 % FA y 80 % G + 20 % FA. Las fases cristalinas predominantes para los productos 70G30FA fueron nefelina y piroxeno, mientras que para los productos 80G20FA la fase principal fue wollastonita. Los vidrios sinterizados a 700 y 800 °C se transformaron en vitrocerámicas sin poros con una absorción de agua insignificante y alta densidad (2,41 - 2,83 g/cm³). La resistencia a la compresión y la microdureza aumentó en proporción a la temperatura de sinterización y la vitrocerámica 70G30FA exhibió el mejor desempeño mecánico respecto a la muestra 80G20FA. En general, los valores de microdureza estuvieron en un rango de 5,47 - 8,89 GPa.

El porcentaje de las materias primas de desecho que pueden usarse para la obtención de vitrocerámicas, depende principalmente de su composición química y de la fase cristalina principal deseada, por lo que en algunos casos se requerirá de la incorporación de óxidos para compensar el déficit de ciertos óxidos precursores de vidrios. De acuerdo con lo reportado por Karamanov, Gutzow, Chomakov, Christov y Kostov (1994), en el caso de una materia prima residual con una alta concentración de CaO, es aconsejable sintetizar material formando principalmente CaO-SiO₂ o soluciones sólidas sobre su base. En presencia de grandes cantidades de MgO y FeO (o Fe₂O₃), es mejor buscar productos en los que prevalezcan las soluciones sólidas de piroxeno. El alto porcentaje de composición de Al₂O₃ no permite el uso de una gran cantidad de este producto de desecho si cabe esperar las fases principales de wollastonita, dióxido y anortita (Karamanov *et al.*, 1994).

La gran cantidad de estudios de investigación llevados a cabo durante la última década, se han centrado en encontrar una solución efectiva para el tratamiento de residuos, logrando que algunos de estos se conviertan en nuevas materias primas para la obtención de nuevos materiales. En términos generales, un desarrollo sostenible depende de la adopción de medidas respetuosas con el medio ambiente, que minimice el uso de recursos no renovables, así como la generación y gestión de desechos, incluidos todos los procesos de fabricación intermedios. Las políticas ambientales cada vez más restrictivas buscan fundamentalmente eliminar o reducir la generación de residuos y la contaminación, es por ello que, el reciclaje es una forma racional de hacer uso de recursos que de otro modo serían arrojados y/o descartados. Esta revisión corrobora el hecho de que es posible obtener nuevos materiales a partir de residuos o mezclas de residuos con resultados prometedores e incluso superiores a la de materiales convencionales.

5. Conclusiones

Actualmente, la principal materia prima para fabricación de vidrio y cerámica en Colombia se obtiene principalmente de fuentes no renovables de energía conduciendo a la distorsión del medio ambiente. La gestión y el reciclaje de residuos ricos en silicatos es un campo importante y poco explorado en Colombia para la producción de vidrio y vitrocerámicas. Adicionalmente, es importante desde el punto de vista de la disminución del impacto ambiental, ya que reduce la explotación de recursos naturales. Por ello, la utilización de desechos ricos en sílice, calcio y alúmina para la producción de vitrocerámicas a nivel mundial ha adquirido gran importancia a lo largo de los últimos años, lo cual se pudo evidenciar por el incremento del número de publicaciones a partir del año 2.000. La disminución en la explotación de recursos naturales y la implementación de materias primas alternativas como cenizas, escorias y residuo de vidrio, entre otros, disminuirá el impacto ambiental y podría llegar a reducir el costo de producción en las industrias de la vitrocerámica.

Al emplearse residuos como los anteriormente nombrados, y debido a la diferente composición química y morfológica de los mismos, son necesarias rutas y condiciones específicas de procesamiento. Entre los factores a considerar se señalan la disponibilidad del residuo, tamaño de partícula, método de procesamiento, y un diseño de mezclas adecuado y ajustado. Al tener un control adecuado de estos parámetros sería posible la obtención de vitrocerámicas con características similares e incluso superiores a las comerciales.

Los resultados de esta revisión muestran el proceso vitrocerámico como una alternativa real y útil para el reciclado de residuos industriales, destacando principalmente los estudios que reemplazan en un 100 % la materia prima no renovable por desechos industriales, dando lugar a nuevos materiales verdes o amigables al ambiente, además, permite obtener productos o materiales avanzados, con altas características físicas y tecnológicas. El método seleccionado para la obtención de materiales vitrocerámicos dependerá en gran medida de las propiedades requeridas del producto final, así como de la composición de los materiales utilizados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle por su financiación a través de los recursos de la Vicerrectoría de Investigaciones a través del proyecto C.I. 2998, titulado “Obtención de materiales vitrocerámicos a partir de desechos industriales colombianos”.

Referencias

- Ali, Ahmed; Ishikawa, S.; Nomura, Kiyoshi; Kuzmann, Erno; Homonnay, Zoltan; Scrimshire, Alex; ... Kubuki, Shiro (2019a). Mössbauer and photocatalytic studies of CaFe_2O_4 nanoparticle-containing aluminosilicate prepared from domestic waste simulated slag. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(3), 1469–1476.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06715-2>
- Ali, Ahmed; Nomura, Kiyoshi; Homonnay, Zoltan; Kuzmann, Erno; Scrimshire, Alex; Bingham, Paul; ... Kubuki, Shiro (2019b). The relationship between local structure and photo-Fenton catalytic ability of glasses and glass-ceramics prepared from Japanese slag. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(2), 751–761.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06726-z>
- Ayala, Diana; Gómez, Jairo; Roether, Judith; Boccaccini, Aldo (2019). Development and characterization of glass-ceramics from combinations of slag, fly ash, and glass cullet without adding nucleating agents. *Materials*, 12(12), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/ma12122032>
- Barbieri, Luisa; Manfredini, T.; Queralt, Ignasi; Rincon, Jesús; Romero, Maximina (1997). Vitrification of fly ash from thermal power stations. *Glass Technology*, 38(5), 165–170.
[https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(98\)80577-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(98)80577-8)
- Barbieri, Luisa; Corradi, A.; Lancellotti, Isabella (2001). Residuos para la producción de vidrios y vitrocerámicos. *Materiales de Construcción*, 51(253–264), 197–208.
- Barbieri, Luisa; Ferrari, Anna; Lancellotti, Isabella; Leonelli, Cristina; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (2000). Crystallization of $(\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO})-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Glassy Systems Formulated from Waste Products. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(10), 2515–2520.
- Barbieri, Luisa; Lancellotti, Isabella; Manfredini, Tiziano; Pellacani, Gian; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (2001). Nucleation and Crystallization of New Glasses from Fly Ash Originating from Thermal Power Plants. *Journal of the American Ceramic Society*, 58, 1851–1858.
- Barbieri, Luisa; Lancellotti, Isabella; Manfredini, Tiziano; Queralt, Ignasi; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (1999). Design, obtainment and properties of glasses and glass-ceramics from coal fly ash. *Fuel*, 78, 271–276.
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00134-3)
- Benavidez, E.; Grasselli, C.; Quaranta, N. (2003). Densification of ashes from a thermal power plant. *Ceramics International*, 29(1), 61–68.
[https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00090-1)
- Bernardo, E.; Pontikes, Y.; Angelopoulos, G. N. (2012). Optimisation of low temperature sinter crystallisation of waste derived glass. *Advances in Applied Ceramics*, 111(8), 472–479.
<https://doi.org/10.1179/1743676112Y.0000000037>

- Callister, Wiliam (2001). *Fundamentals of materials science and engineering*. New York, EE.UU.: Wiley.
- Cao, Jianwei; Wang, Zhi (2013). Effect of Na₂O and heat-treatment on crystallization of glass-ceramics from phosphorus slag. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 190–195.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.013>
- Cedillo, Erika (2010). Síntesis y caracterización de materiales vitrocerámicos a partir de escorias metalúrgicas y su posible aplicación tecnológica (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico.
- Chen-Shiuan, Fan; Kung-Cheh, Li (2013). Production of insulating glass ceramics from thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass and calcium fluoride sludge. *Journal of Cleaner Production*, 57, 335–341.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.002>
- Chen, Hua; Li, Baowei; Zhao, Ming; Zhang, Xuefeng; Du, Yongsheng; Shi, Yu; McCloy, John (2019). Lanthanum modification of crystalline phases and residual glass in augite glass ceramics produced with industrial solid wastes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 524(May), 119638.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119638>
- Cheng, Ta-Wui; Ueng, T.; Chen, Y. S.; Chiu, J. P. (2002). Production of glass-ceramic from incinerator fly ash. *Ceramics International*, 28, 779–783. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00043-3).
- Chinnam, R. K.; Francis, A. A.; Will, J.; Bernardo, E.; Boccaccini, A. R. (2013). Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 365, 63–74.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.12.006>
- Colombo, P.; Brusatin, G.; Bernardo, E.; Scarinci, G. (2003). Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 7(3), 225–239.
<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.08.002>
- Çoruh, Semra; Ergun, Osman; Cheng, Ta-Wui (2006). Treatment of copper industry waste and production of sintered glass-ceramic. *Waste Management and Research*, 24(3), 234–241.
<https://doi.org/10.1177/0734242X06062600>
- Das, K.; Raha, S.; Chakraborty, D.; Burhanuddin S.; Saheb Ali, S. (2012). Effect of nucleating agents on the crystallization and microstructural characteristics of blast furnace slag derived glass-ceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 71(3), 137–142.
<https://doi.org/10.1080/0371750X.2012.738482>
- Dávalos, Julián; Bonilla, Ashley; Villaquirán-Cacedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby (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*, In Press.
<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002>
- DeGuire, Eileen; Risbud, Subhash (1984). Crystallization and properties of glasses prepared from Illinois coal fly ash. *Journal of Materials Science*, 19(6), 1760–1766.
- Deubener, J.; Allix, M.; Davis, M. J.; Duran, A.; Höche, T.; Honma, T.; ... Zhou, S. (2018). Updated definition of glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 501, 3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.033>
- Erkmen, Z. E.; Çatakli, E.; Öveçoğlu, L. M. (2009). Characterisation and crystallisation kinetics of glass ceramics developed from Erdemir blast furnace slags containing Cr₂O₃ and TiO₂ nucleants. *Advances in Applied*

Ceramics, 108(1), 57–66.

<https://doi.org/10.1179/174367608X364294>

Erol, M; Küçükbayrak, S; Ersoy-Meriçboyu, A. (2007). Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production. *Fuel*, 86, 706–714.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.09.009>

Francis, A. A. (2004). Conversion of blast furnace slag into new glass-ceramic material. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(9), 2819–2824.

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.08.019>

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Boccaccini, Aldo (2002). Glass-ceramics from mixtures of coal ash and soda-lime glass by the petrucic method. *Journal of Materials Science*, 21, 975–980.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(03\)81931-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(03)81931-8)

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Sweeney, R.; Boccaccini, Aldo (2002). Processing of coal ash into glass ceramic products by powder technology and sintering. *Glass Technology*, 43(2), 58–62.

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Sweeney, R; Boccaccini, Aldo (2004). Crystallization kinetic of glass particles prepared from a mixture of coal ash and soda-lime cullet glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 333, 187–193.

<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.09.048>

Hanpongpun, Wilasinee; Jiemsirilers, Sirithan; Thavorniti, P. (2007). Effects of Clear and Amber Cullet on Physical and Mechanical Properties of Glass-Ceramics Containing Zinc Hydrometallurgy Waste. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1(11), 1305–1312.

<https://doi.org/10.1299/jmmp.1.1305>

Hieu, Dinh; Wang, Kuen-Sheng; Chen, Jung-Hsing; Xuan, Bui; Hoang, Bui (2012). Glass – ceramic from mixtures of bottom ash and fly ash. *Waste Management*, 32, 2306–2314.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.040>

Höland, Wolfram; Beall, George (2012). *Glass-Ceramic Technology* (2da Edición). EE.UU: Wileys.

Isa, Hauwa (2011). A review of glass-ceramics production from silicate wastes. *International Journal of Physical Sciences*, 6(30), 6781–6790.

<https://doi.org/10.5897/IJPS11.153>

Jani, Yahya; Hogland, William (2014). Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1767–1775.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>

Jia, Ruidong; Deng, Leibo; Yun, Fei; Li, Hao; Zhang, Xuefeng; Jia, Xiaolin (2019). Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 233(March), 155–162.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>

Kalirajan, M.; Ranjeeth, R.; Vinathan, R.; Vidyavathy, S. M.; Srinivasan, N. R. (2016). Influence of glass wastes on the microstructural evolution and crystallization kinetics of glass-ceramic glaze. *Ceramics International*, 42(16), 18724–18731.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.011>

Karamanov, Alexander (2009). Granite like materials from hazardous wastes obtained by sintercrystallisation of glass frits. *Advances in Applied Ceramics*, 108(1), 14–21.

<https://doi.org/10.1179/174367608X364302>

- Karamanov, Alexander; Aloisi, Mirko; Pelino, Mario (2007). Vitrification of copper flotation waste. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1–2), 333–339.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.040>
- Karamanov, Alexander; Gutzow, Ivan; Chomakov, Ivan; Christov, Jancho; Kostov, Lyubomir (1994). Synthesis of wall-covering glass-ceramics from waste raw materials. *Glass Science and Technology Frankfurt*, 67(8), 227–230.
[https://doi.org/10.1016/0140-6701\(95\)80729-2](https://doi.org/10.1016/0140-6701(95)80729-2)
- Karamberi, A.; Moutsatsou, A. (2004). Characterization of glass and glass-ceramics obtained from industrial by-products. *Waste Management and the Environment*, 78(9), 377–385. 10.2495/WM040371
- Karmakar, B.; Rademann, Klaus; Stepanov, Andrey (2016). *Glass nanocomposites: Synthesis, properties and applications*. EE.UU: Elsevier.
- Khaidir, Rahayu; Fen, Yap; Zaid, Mohd; Matori, Khamirul; Omar, Nur; Anuar, Muhammad; ... Azman, Aisyah (2019). Optical band gap and photoluminescence studies of Eu 3+ -doped zinc silicate derived from waste rice husks. *Optik*, 182, 486–495.
<https://doi.org/10.1016/j.jileo.2019.01.061>
- Lee, Chee; Matori, Khamirul; Aziz, Sidek; Kamari, Halimah; Ismail, Ismayadi; Zaid, Mohd (2017). Fabrication and characterization of glass and glass-ceramic from rice husk ash as a potent material for opto-electronic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(23), 17611–17621.
- Leroy, C.; Ferro, M.C.; Monteiro, R.C.C.; Fernandes, M.H.V. (2001). Production of glass-ceramics from coal ashes. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 195–202.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00193-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00193-X)
- Li, Yu; Dai, Wen-Bin (2018). Modifying hot slag and converting it into value-added materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 175, 176–189.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.171>
- Liu, Bo; Yang, Qiang; Zhang, Shen (2019). Integrated utilization of municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash for preparation of foam glass-ceramics. *Rare Metals*, 38(10), 914–921.
<https://doi.org/10.1007/s12598-019-01314-2>
- Liu, Zhaobo; Zong, Yanbing; Feng, Huan; Cang, Daqiang (2015). Influence of Ferrum on Crystallization and Microstructure of Steel Slag Based Glass-Ceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 74(1), 29–34. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2014.988831>
- Ljati, Ejup; Kamusheva, Alexandra; Grozdanov, Anita; Paunovi, Perica; Karamanov, Alexander (2015). Optimal thermal cycle for production of glass – ceramic based on wastes from ferronickel manufacture. *Ceramics International*, 41, 11379–11386.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.098>
- Lu, Jinshan; Lu, Zhangyang; Peng, Changhao; Li, Xibao; Jiang, Hongliu (2014). Influence of particle size on sinterability, crystallisation kinetics and flexural strength of wollastonite glass-ceramics from waste glass and fly ash. *Materials Chemistry and Physics*, 148(1–2), 449–456.
- Luan, Jingde; Li, Aimin; Su, Tong; Cui, Xiaobo (2010). Synthesis of nucleated glass-ceramics using oil shale fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 427–432.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.099>
- Mejía, Johanna; Rodríguez, Erich; Mejía De Gutiérrez, Ruby (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 309–327.

- Mihailova, Irena; Djambazki, P. R.; Mehandjiev, D. (2011). The effect of the composition on the crystallization behavior of sintered glass-ceramics from blast furnace slag. *Bulgarian Chemical Communications*, 43(2), 293–300.
- Montazerian, Maziar; Singh, Shiv; Dutra, Edgar (2015). An analysis of glass-ceramic research and commercialization. *American Ceramic Society Bulletin*, 94(4), 30–35.
- Montoya-Quesada, Estefanía; Villaquirán-Caicedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby; Muñoz-Saldaña, J. (2019). Effect of ZnO content on the physical, mechanical and chemical properties of glass-ceramics in the CaO–SiO₂–Al₂O₃ system. *Ceramics International*.
<https://doi.org/10.1016/j.CERAMINT.2019.10.154>
- Öveçoğlu, M. L. (1998). Microstructural characterization and physical properties of a slag-based glass-ceramic crystallized at 950 and 1100 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(2), 161–168.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(97\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(97)00094-0)
- Pan, De'an; Zhang, S. G.; Bao, H. B.; Guo, B.; Liu, B. (2015). A method for preparing Hedenbergite Glass Ceramics by Lead Slag. China. Patente CN104773958A
- Pan, De'an; Li, Lili; Tian, Xi; Wu, Yufeng; Cheng, Na; Yu, Hailiang (2019). A review on lead slag generation, characteristics, and utilization. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 140–155.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.036>
- Pelino, M.; Cantalini, C.; Rincón, J. M. (1997). Preparation and properties of glass-ceramic materials obtained by recycling goethite industrial waste. *Journal of Materials Science*, 32(17), 4655–4660.
- Ponsot, Inès; Pontikes, Yiannis; Baldi, Giovanni; Chinnam, Rama; Detsch, Rainer; Boccaccini, Aldo; Bernardo, Enrico (2014). Magnetic Glass Ceramics by Sintering of Borosilicate Glass and Inorganic Waste. *Materials*, 7, 5565–5580.
- Rawlings, R. D.; Wu, J. P.; Boccaccini, Aldo (2006). Glass-ceramics : Their production from wastes — A Review. *Journal of Materials Science*, 41, 733–761.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-6554-3>
- Rincón, J. M.; Romero, M. (1996). Los materiales vitrocerámicos en la construcción. *Materiales de Construcción*, 46(242–243), 91–106.
- Romero, Maximina; Rincón, Jesús; González, Carlos; D'Ovidio, Carlos; Esparza, Daniel (2001). Magnetic properties of glasses with high iron oxide content. *Materials Research Bulletin*, 36(7–8), 1513–1520.
[https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(01\)00630-4](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(01)00630-4)
- Romero, Maximina; Kovacova, M.; Rincón, Jesús (2008). Effect of particle size on kinetics crystallization of an iron-rich glass. *Journal of Materials Science*, 43(12), 4135–4142.
<https://doi.org/10.1007/s10853-007-2318-y>
- Romero, Maximina; Rincón, Jesús (2000). El proceso de vitrificación/cristalización controlada aplicado al reciclado de residuos industriales inorgánicos. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(1), 155–163.
- Rondón, H.; Fernández, W.; Patiño, D.; Ruge, J.; Vacca, H.; Reyes, F. (2018). Characterization of blast furnace slag for road projects. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 83–92.
- Sánchez, Hector (2014). Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. In *V congreso de Ingeniería Civil* (pp. 1–14).
- Sarrigani, Gholamreza; Amiri, Iraj (2019). Literature Review of Glass-Ceramic and Willemite Production

- from Waste Materials. In: *Willemite-Based Glass Ceramic Doped by Different Percentage of Erbium Oxide and Sintered in Temperature of 500-1100C* (pp. 13-27). Cham: Springer Briefs in Electrical and Computer Engineeri.
- https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-10644-7_2
- Savvilotidou, Vasiliki; Kritikaki, Anna; Stratakis, Antonios; Komnitsas, Konstantinos; Gidakos, Evangelos (2019). Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash. *Waste Management*, 90, 46–58.
- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.022>
- Shackelford, James (2005). *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros* (6ta Edición). Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Silva, R. V.; de Brito, J.; Lye, C. Q.; Dhir, R. K. (2017). The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, 167(20), 346–364.
- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
- Silva, R. V.; de Brito, J.; Lynn, C. J.; Dhir, R. K. (2019). Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(June 2018), 23–35.
- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
- Suzdal'tsev, E. I. (2002). Effect of temperature on the structuring and properties of glass and glass ceramic of lithium aluminosilicate composition. *Refractories and Industrial Ceramics*, 43, 127–135.
- Teixeira, S. R.; Magalhães, R. S.; Arenales, A.; Souza, A. E.; Romero, M.; Rincón, J. M. (2014). Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 134, 15–19.
- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.029>
- Wan, Wan; Matori, Khamirul; Mohd, Mohd; Zainuddin, Norhazlin; Ahmad, Mohammad; Abdul, Nadia; ... Kul, Esra (2019). Effect of sintering temperature on physical and structural properties of Alumino-Silicate-Fluoride glass ceramics fabricated from clam shell and soda lime silicate glass. *Results in Physics*, 12, 1909–1914.
- <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.077>
- Wang, Shuming; Liang, Kaiming (2007). High infrared radiance glass-ceramics obtained from fly ash and titanium slag. *Chemosphere*, 69(11), 1798–1801.
- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.016>
- Wang, Zhong; Ni, Wen; Jia, Yan; Zhu, Li; Huang, Xiao (2010). Crystallization behavior of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(31–32), 1554–1558.
- <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.05.063>
- World Energy Council. (2016). *World Energy Resources 2016*. Recuperado de: https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf
- Yang, Zhihong; Lin, Qiao; Lu, Shengchun; He, Yong; Liao, Guangdong; Ke, Yi (2014). Effect of CaO/SiO₂ ratio on the preparation and crystallization of glass-ceramics from copper slag. *Ceramics International*, 40(5), 7297–7305.
- <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.071>

- Yang, Zhihong; Lin, Qiao; Xia, Jixiang; He, Yong; Liao, Guangdong; Ke, Yi (2013). Preparation and crystallization of glass-ceramics derived from iron-rich copper slag. *Journal of Alloys and Compounds*, 574, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.091>
- Yoon, S. D.; Yun, Y. H. (2008). Chemical durability of glass-ceramics obtained from waste glass and fly ash. *Journal of Ceramic Processing Research*, 9(2), 135–139.
- Zeng, Li; Sun, Hong-juan; Peng, Tong-jiang; Zheng, Wen-miao (2019). The sintering kinetics and properties of sintered glass-ceramics from coal fly ash of different particle size. *Results in Physics*, 15(October), 102774. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102774>
- Zeynel, C. (2018). *Global slag 2018 review*. Recuperado de <http://www.globalslag.com/about-us/24-global-slag/conferences/672-global-slag-2018-review>