

Evaluación de las características de un residuo de la industria del vidrio para encapsular materiales peligrosos

Evaluation of a glass industry waste characteristics to encapsulate hazardous materials

Maira Alejandra Narváez-Legarda ^{1a}, Luisa Fernanda Mosquera-Idrobo ^{1b}, Janneth Torres-Agredo ^{1c}

¹Grupo Materiales y Medio Ambiente (Gimma), Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Correos electrónicos: ^a mnarvaezl@unal.edu.co, ^b lufmosqueraid@unal.edu.co, ^c jtorresa@unal.edu.co

Recibido: 22 agosto, 2019. Aceptado: 13 febrero, 2020. Versión final: 2 marzo, 2020.

Resumen

Actualmente, existe una gran problemática ambiental por la generación de residuos sólidos, muchos de éstos se clasifican como peligrosos; por lo cual han surgido múltiples tecnologías para su tratamiento, entre las que se destaca la vitrificación. Esta tecnología permite incorporar los elementos peligrosos de un residuo dentro de una matriz vítrea; por lo tanto, se requiere de un agente vitrificante o formador de vidrio (sílice, SiO₂). El objetivo de este trabajo fue evaluar las características químicas y físicas de un residuo de arena, con el fin de emplearlo como agente vitrificante. El residuo de arena del presente estudio, proviene de una industria de vidrio colombiana y su generación es de 120 toneladas mensuales. Se realizó la caracterización del residuo en cuanto al tamaño de partícula, densidad, morfología, composición química y mineralógica. Finalmente, se concluye que el residuo tiene características de agente vitrificante; además, presenta un gran potencial para ser aprovechado en diferentes aplicaciones.

Palabras clave: aprovechamiento; residuo de arena; residuos industriales; vitrificación; encapsulación.

Abstract

Currently, there is a great environmental problem due to excessive generation of solid waste, many of these are classified as hazardous waste, therefore multiple technologies have emerged for their treatment, among these, vitrification is highlighted. This process is based on incorporating the dangerous elements into a glass network, therefore it requires a vitreous agent or glass forming (Silica, SiO₂). The aim of this work was to evaluate chemical and physical characteristics of a sand waste, in order to use it as a vitreous agent. The waste sand comes from a Colombian glass industry and its generation is approximately 120 tons per month. The characterization of the residue was performed, in terms of particle size, density, morphology, chemical and mineralogical composition. Finally, it is concluded that the residue has vitrifying agent characteristics; it also has great potential to be used in different applications.

Keywords: use; sand waste; industrial waste; vitrification, encapsulation.

1. Introducción

En las últimas décadas, el rápido crecimiento de la economía y de la sociedad ha provocado un aumento en la generación de los residuos sólidos; causando problemas ambientales que afectan directamente la salud humana y dañan el medio ambiente [1]. Muchos residuos

sólidos se clasifican como residuos peligrosos, por lo cual se ha generado un gran interés por los métodos de inmovilización que permiten disponer de forma segura los residuos que contienen metales lixiviables. Algunos de estos métodos son la solidificación/estabilización a base de cemento, a base de geopolímeros, carbonatación y la vitrificación, entre otros [2].

El método de vitrificación permite que los residuos peligrosos se conviertan en un vidrio estable y homogéneo, resistente a la lixiviación. Durante el proceso, la fracción orgánica se descompone, mientras que la fracción inorgánica se estabiliza, puesto que sus elementos se introducen en el nivel atómico dentro de la red de vidrio. Este método permite la estabilización completa de sustancias inorgánicas peligrosas y reduce el volumen de los residuos tratados. Además, puede ser utilizado para el tratamiento de una gran variedad de residuos con diversas composiciones y formas [3]. Sin embargo, para llevar a cabo este proceso se requiere de altas temperaturas, lo que implica altos costos [4].

En los últimos años, la vitrificación se ha investigado y llevado a cabo con éxito para diferentes residuos; como escorias de acero, residuos radiactivos, cenizas, lodos, residuos de asbestos o amianto, entre otros [4]. Generalmente, el objetivo de las investigaciones sobre vitrificación se centra en la inertización de residuos y en el potencial aprovechamiento de los residuos vitrificados, como material de construcción. A continuación, se mencionan algunos trabajos basados en esta técnica.

Çoruh y Ergun [5] evaluaron el comportamiento de lixiviación de residuos de flotación de cobre antes y después del proceso de vitrificación. Los principales compuestos de los residuos de flotación de cobre eran Fe_2O_3 y SiO_2 . Las pruebas de lixiviación se realizaron a través de tres métodos, Procedimiento característico de toxicidad (TCLP, por sus siglas en inglés), EP Tox y un procedimiento de extracción estandarizado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM); los metales tóxicos estudiados fueron Cu, Zn y Pb. El proceso de vitrificación, se realizó a una temperatura de $1200\text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 minutos y se adicionó SiO_2 , Na_2CO_3 y CaCO_3 en diferentes proporciones. Como resultado obtuvieron que la lixiviación de los tres metales antes de la vitrificación sobrepasaba los límites establecidos por la normatividad Turca y los estándares de la EPA, mientras que después de la vitrificación se redujo en gran medida la lixiviación de los metales evaluados. Además, encontraron que la adición de SiO_2 dio mayor estabilidad al vidrio y, a medida que el porcentaje de SiO_2 era mayor en la mezcla, la lixiviación de los metales disminuyó.

Bernardo [6], utilizó residuos de vidrio reciclado con la siguiente composición; SiO_2 (71,1%), Na_2O (12,9%), CaO (9,9%) y en menores proporciones MgO , Al_2O_3 y K_2O con 2,2%, 2,2 % y 0,9 % respectivamente. Así como residuos de mina con SiO_2 (67,3%), Al_2O_3 (18,3%), Na_2O (8,7%). Estos residuos fueron utilizados para obtener un material vitrocerámico mediante un proceso rápido de sinterización-cristalización. Según los autores, el material obtenido puede ser utilizado como agregado

de pisos o paredes en construcción, debido a sus propiedades mecánicas como resistencia a la flexión y dureza.

Ali, Mohd y Mansor [7], utilizaron el método de vitrificación para estabilizar lodos de refinerías que contenían metales pesados como Fe, Al, Mg, Au, As, Zn, Pb y Ni. El proceso de vitrificación se realizó en un rango de temperatura entre $1320\text{-}1400\text{ }^\circ\text{C}$; este proceso dio como resultado la reducción de la lixiviación de los metales estudiados, cumpliendo con los estándares establecidos en Malasia, excepto para el As. Por último, los autores establecieron que el proceso de vitrificación puede reducir la contaminación ambiental generada por los lodos de petroquímicas y de refinerías.

Varitis et al. [8], emplearon el proceso de vitrificación para la estabilización de cenizas ricas en Cr provenientes de la incineración de lodos de curtiembres. Para llevar a cabo el proceso, se prepararon diferentes lotes con cenizas, Na_2CO_3 , CaCO_3 y SiO_2 (como agente formador de vidrio). Las cenizas evaluadas contenían cantidades significativas de carbono orgánico y cromo trivalente. El ensayo de lixiviación se realizó según el método EN 12457-4, encontrando que la lixiviación de los productos vitrificados estaba por debajo del límite para Cr según la Unión Europea que es de 10 mg/kg , concluyendo que los residuos después del proceso de vitrificación se pueden disponer en rellenos como un residuo no peligroso.

Por otro lado, un vidrio se compone principalmente de sílice (SiO_2), siendo ésta la materia prima vitrificante (permite la formación de la matriz vítrea), también pueden actuar otros elementos como B, V y P. En cuanto a los fundentes para la producción de vidrio, se utilizan óxido de calcio (CaO), óxido de sodio (Na_2O) y, el óxido de aluminio (Al_2O_3) es utilizado como un estabilizador de la red vítrea. Para la obtención de materiales vitrificados se pueden utilizar residuos que permiten sustituir las materias primas vírgenes. Uno de los residuos utilizados como materia prima para la vitrificación es la arena de fundición, su importancia para el proceso de vitrificación radica en que la arena está constituida principalmente por cuarzo [9]. Las cenizas de carbón se han reportado como potencial materia prima de la industria cerámica y vidrio [10].

Considerando que en el proceso de vitrificación se pueden utilizar residuos para sustituir la materia prima virgen, este trabajo tiene como objetivo evaluar las características químicas y físicas de un residuo de la industria del vidrio, con el fin de que sea utilizado como agente vitrificante; y así darle un valor agregado y reducir la cantidad de materia prima utilizada para dicha técnica.

2. Materiales y métodos

El residuo utilizado para este estudio proviene de una industria de vidrio colombiana, el cual es generado durante el proceso de purificación de la materia prima (sílice o arena). Se evaluaron dos muestras del residuo de arena (RA1 y RA2), las cuales se tomaron en diferentes tiempos de producción. La cantidad de residuo que se genera en la empresa es de alrededor de 120 ton/mes. El material fue analizado a través de la composición química y mineralógica, densidad, tamaño de partícula y morfología.

La composición química, se determinó mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagisPro PW- 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW.

La composición mineralógica, se determinó mediante un difractómetro de rayos X marca PANalytical modelo X'PERT PRO MPD. La muestra fue medida en una configuración óptica de Bragg – Brentano con un detector de estado sólido de alta velocidad para la adquisición de datos denominado PIXcel y un tubo generador de rayos X con ánodo de Cobre (longitud de onda de 1.54 Å).

La densidad aparente, se realizó de acuerdo a la norma ASTM D4254 –16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.

El tamaño de partícula, se determinó a partir de la técnica de Granulometría Láser, MasterSizer 2000, entre un rango de 0,02 a 2000 µm.

Adicionalmente, el residuo se observó morfológicamente utilizando un Microscopio Óptico. Las imágenes provenientes del microscopio se analizaron mediante un programa de procesamiento de imagen digital "ImageJ" para determinar el tamaño de las partículas. Con el programa se logró delimitar el diámetro y el área y, con éstos se determinó el diámetro promedio de las partículas. Para hacer uso del programa se exportaron las imágenes, y éstas se calibraron de acuerdo a la escala en la que fue tomada, en éste caso, las imágenes tenían una escala de 200 µm. Posteriormente, se introdujeron los parámetros a determinar (área y perímetro).

3. Resultados y discusión

3.1. Composición química del residuo

En la Tabla 1, se presenta la composición química de RA1 y RA2 donde se observa que el residuo está

compuesto principalmente de SiO₂ con un porcentaje mayor al 90% y en menor proporción TiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

La composición química del residuo es similar a la reportada en varios estudios, donde emplean arena y residuos silíceos para la producción de vidrio y para la vitrificación de residuos peligrosos. Binhussain et al. [11], Khater [12], Barbieri et al. [13], Gomes, De Borba y Riella [14], Hreglich et al. [15] y Pelino [16], reportan SiO₂ como componente principal con un contenido superior al 70% en peso.

Por otro lado, Çoruh y Ergun [5] encontraron que la adición de SiO₂ permite una mayor estabilidad química del vidrio y, además cuando el porcentaje de SiO₂ era mayor en la mezcla, la lixiviación de los metales disminuyó en los productos vitrificados.

De acuerdo a lo anterior, el residuo de arena objeto de estudio, puede ser empleado como agente vitrificante, debido a su alto contenido de sílice.

3.2. Composición mineralógica del residuo

En la Figura 1, se presenta el difractograma de la muestra del residuo de arena; donde se identificaron los ángulos 2°Teta 21,02°, 26,80°, 39,66°, 50,31° y 60,14°. Dichos valores son similares a los reportados en la base de datos PDF-2 del Centro Internacional de datos de Difracción (ICDD, por sus siglas en inglés), para el cuarzo [17-18]. El análisis de los patrones de DRX, muestra la presencia de una sola fase cristalina, cuarzo (SiO₂). También, se observa que la muestra es completamente cristalina.

3.3. aracterísticas físicas del residuo

A continuación se presentan las características físicas del residuo de arena referentes a densidad, tamaño de partícula y morfología.

3.3.1. Densidad

El residuo de arena presentó una densidad aparente de 1,646 g/cm³. Naik et al. [19], Siddique et al. [20], Singh [21], Basar y Deveci [22], Iloh et al. [23], Deng y Tikalsky [24]; en sus estudios reportan valores de densidades que varían de 1,3 a 1,8 g/cm³ para arenas; densidades similares a la obtenida en este trabajo. Es importante resaltar que la variación en la densidad de un material se atribuye al tamaño de partícula, al contenido fino, la mineralogía y la forma del grano [24].

Tabla 1. Composición química del residuo

Compuesto	RA1 (%)	RA2 (%)	Compuesto	RA1 (%)	RA2 (%)
SiO ₂	91,47	96,29	Ba	0,06	0,02
TiO ₂	3,44	0,53	K ₂ O	0,04	0,03
Al ₂ O ₃	2,17	1,11	V	0,02	28 ppm
Fe ₂ O ₃	1,23	0,64	Cr	0,02	0,02
Na ₂ O	0,43	0,5	MnO	0,02	-
SO ₃	0,25	0,49	Y	0,02	11 ppm
Zr	0,21	79 ppm	Nb	0,02	16 ppm
MgO	0,19	0,08	Sr	0,01	23 ppm
CaO	0,16	0,07	Pb	59 ppm	46 ppm
P ₂ O ₅	0,13	0,09	Zn	52 ppm	-
Cl	0,1	0,12			

Fuente: elaboración propia.

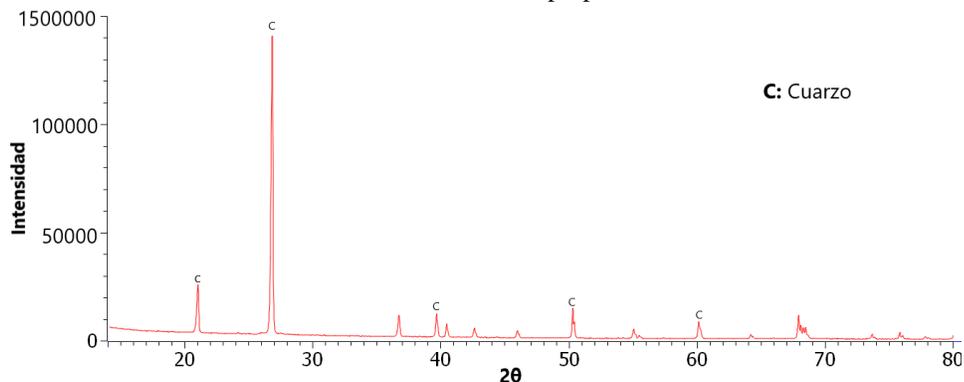


Figura 1. Composición mineralógica del residuo.

Fuente: elaboración propia.

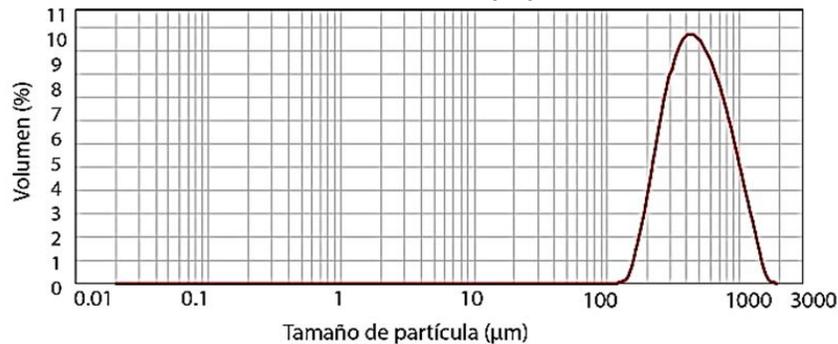


Figura 2. Distribución del tamaño de partícula del residuo de vidrio.

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Granulometría

En la Figura 2, se muestra la distribución de partícula en volumen (%) para el residuo de arena. El tamaño medio de partícula es de 543,494 µm (0,5 mm).

De acuerdo con Groover [25], el tamaño de partícula ideal de la arena para la fabricación de vidrio debe de estar entre 0,1 a 0,6 mm. Por otro lado, Fernández [26]

plantea que el tamaño de la arena debe estar entre 0,1 y 0,3 mm para fusión en crisol, mientras que, para hornos balsa el límite puede ser hasta 0,5 mm. Además, Hreglich et al. [15] para la vitrificación de una escoria de plomo utilizaron residuos silíceos con tamaños de partículas menores a 10 mm. Estudios adicionales sobre arenas de fundición reportan tamaños entre 0,15 y 0,80 mm [19] [23], [24].

Según el análisis granulométrico del residuo de vidrio, se puede afirmar que éste presenta el tamaño de partícula necesario para la fabricación del vidrio y proceso de vitrificación.

3.3.3. Análisis Morfológico

En las Figuras 3 y 4 se presentan las imágenes tomadas a través del microscopio óptico, en las cuales se analiza el tamaño de la partícula y el área promedio del residuo. En este caso, se observa que el residuo presenta una forma irregular y que algunas partículas presentan coloración, lo que indicaría la presencia de Hierro; lo cual se señala en su composición química (Tabla 1). La morfología es similar a la de una arena de cuarzo, por sus características amorfas, superficies lisas y aristas irregulares [27]. Además, su morfología coincide con lo reportado por Iloh et al. [23], donde encontraron granos angulares con superficies compactas y partículas más pequeñas unidas con algunas discontinuidades, en todas las muestras de

arena evaluadas. En cuanto al tamaño de partícula obtenido por el programa “ImageJ”, se determinó un valor promedio de diámetro de partícula de 0.56 mm, valor similar a lo obtenido por la técnica de granulometría láser.

4. Aplicaciones

En los últimos años, se han establecido diferentes tecnologías de reciclaje y diversas reglamentaciones que promueven la recuperación de los residuos. Sin embargo, estos avances no están en equilibrio con el consumo acelerado de la sociedad, lo que ha generado que cada vez sea mayor el volumen de residuos que se disponen en rellenos sanitarios [28]. Por lo tanto, es importante buscar diversas alternativas de aprovechamiento del residuo de arena, objeto de estudio; para lograr que sea aprovechado en su totalidad en el futuro.

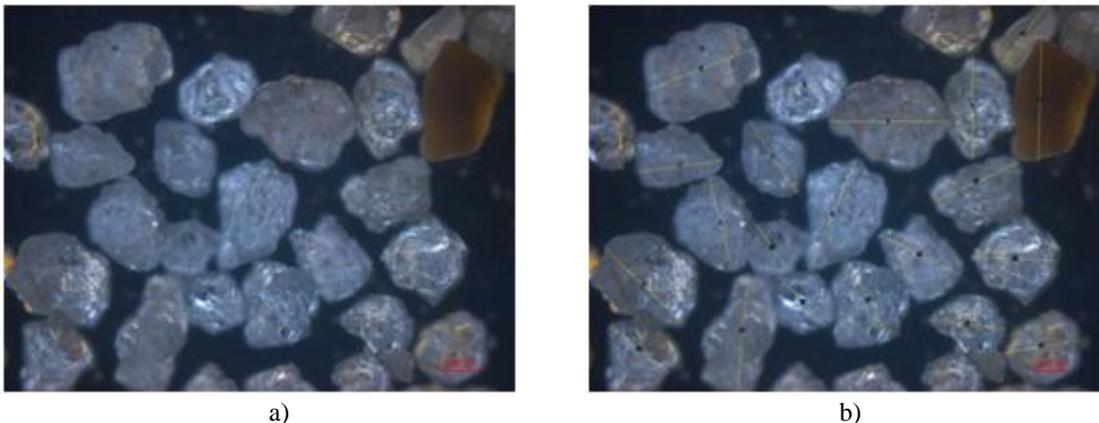


Figura 3. (a) Imagen tomada del microscopio óptico. (b) Imagen analizada con ImageJ. Área promedio de partículas= 0,24 (m²), Perímetro promedio= 0,24 (m), Diámetro promedio 0,55 (mm).

Fuente: elaboración propia.

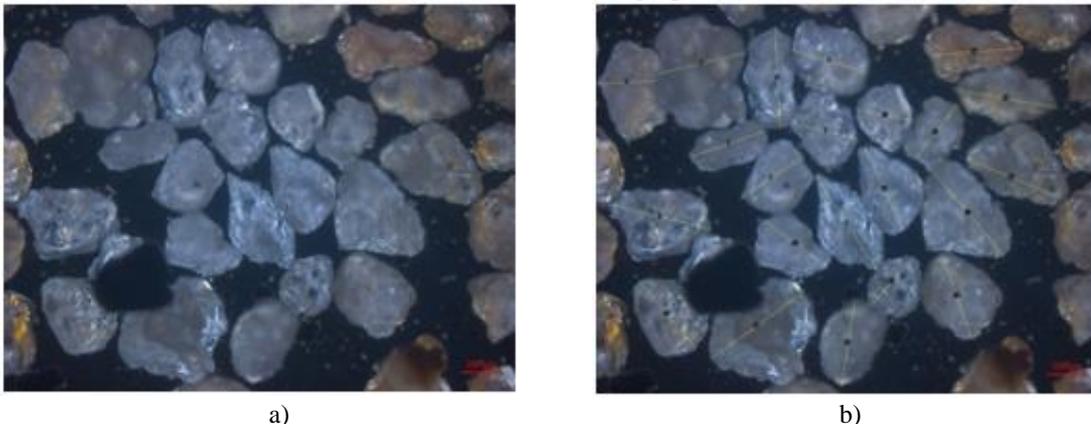


Figura 4. (a) Imagen tomada del microscopio óptico. (b) Imagen analizada con ImageJ. Área promedio de partículas= 0,24 (m²), Perímetro promedio= 0,24 (m), Diámetro promedio 0,57 (mm).

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan algunas investigaciones de residuos silíceos, similares al residuo de arena objeto de este estudio que han sido evaluados para ser utilizados como materiales de construcción.

Fu et al. [29], evaluaron el efecto de la adición de residuos silíceos con un contenido de SiO_2 (67,1%) al cemento mezclado; donde se encontró que dichos residuos mejoran las propiedades del cemento como dureza y resistencia al ataque químico.

Guney et al. [30], estudiaron los residuos de la arena de fundición para la producción de concreto de alta resistencia. Este residuo presentó un contenido de SiO_2 del 98%, con un tamaño medio de partícula menor a 1 mm. Los autores evaluaron porcentajes de adición del 0%, 10% y 15% como reemplazo de la arena natural. Como resultados obtuvieron que con 10% de adición, el concreto presentaba propiedades mecánicas similares a las muestras control; encontrándose dentro de los límites aceptables establecidos por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés). Este residuo también se ha utilizado para la construcción de caminos, fabricación de cemento Portland, morteros y vitrificación de materiales peligrosos.

Así mismo, otros estudios mencionan el gran potencial de diferentes tipos de arena como agregados en el concreto, donde además de dar un valor agregado a estos residuos de arenas, mencionan propiedades adicionales para el concreto. Entre estos se encuentran, Siddique et al. [20], Singh [21], Iloh et al. [23]; quienes reportaron que los principales componentes de los residuos de arena de fundición fueron sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3). Los contenidos de SiO_2 reportados por los autores mencionados fueron 89.32, 83.80 y 78.81% en peso respectivamente; sin embargo, no alcanzan el 90%. Además, Basar y Deveci [22] y Etxeberria et al. [31] reportan composiciones de arenas con un contenido de SiO_2 mayor a 95% en peso.

Por otro lado, Gupta y Vyas [32] utilizaron residuos de granito como un agregado fino, con el fin de reemplazar la arena natural en mezclas de mortero. Este residuo presentó un contenido de SiO_2 del 74,39% y los principales componentes fue el cuarzo y k-feldespato. Los resultados del estudio, indicaron que los morteros con residuo de granito presentaron mejores propiedades mecánicas que los convencionales.

Cabe resaltar que el residuo de arena objeto de este estudio, es un residuo no peligroso, lo cual amplía su potencial de aprovechamiento para diferentes aplicaciones.

De acuerdo a las características químicas, mineralógicas y físicas del residuo de arena, se considera que este residuo puede ser empleado para encapsular diversos residuos peligrosos; sin necesidad de tratamientos previos, lo que supone una ventaja en términos económicos. Además, el empleo de este residuo permitirá reducir la demanda de arena natural para llevar a cabo la técnica de vitrificación, lo que conlleva a beneficios económicos y ambientales. Es importante resaltar que los productos de la vitrificación pueden ser empleados en la industria de la construcción para la obtención de materiales cerámicos y vitrocerámicos. Además, este residuo presenta un gran potencial para ser utilizado como materia prima secundaria para la producción de diversos materiales de construcción. En ese sentido, el aprovechamiento del residuo tanto en la técnica de vitrificación como en materiales de construcción, podrá reducir la cantidad de residuo que se dispone en rellenos sanitarios.

5. Conclusiones

De acuerdo a la composición química del residuo de arena, éste presenta mayoritariamente sílice, lo que le confiere gran potencial de aprovechamiento como agente vitrificante para el desarrollo de la técnica de vitrificación con el fin estabilizar residuos peligrosos. Además, el residuo cuenta con agentes fundentes (CaO), (Na_2O) y estabilizadores (Al_2O_3), lo que supone una menor cantidad de aditivos al vitrificado, dependiendo de la fórmula y especificación requerida.

En la técnica de vitrificación, el uso de residuos con altos contenidos de sílice permitirá reducir la lixiviación de los elementos peligrosos en los productos vitrificados.

De acuerdo a las características físicas del residuo de arena, éste se puede usar sin necesidad de realizar una molienda previa, lo que representa un factor económico positivo para el aprovechamiento del residuo.

El aprovechamiento de este residuo para estabilizar materiales peligrosos representa una oportunidad en el ámbito de la reducción de impactos ambientales generados en el sector industrial; por lo cual vale la pena realizar investigaciones posteriores sobre la materia prima y condiciones de proceso para aplicar la técnica de vitrificación.

El residuo evaluado puede ser aprovechado en otras aplicaciones como en la producción de concreto y morteros de cemento; todo esto debido a sus características químicas y físicas.

Referencias

- [1] W. Cai, C. Liu, C. Zhang, M. Ma, W. Rao, W. Li, K. He y M. Gao, “Developing the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on emergy for sustainable development”, *Energy*, vol. 157, pp. 940-948, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.05.207
- [2] B. Guo, B. Liu, J. Yang y S. Zhang, “The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: A review”, *Journal of Environmental Management*, vol. 193, pp. 410-422, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.026
- [3] E. Bernardo, G. Scarinci y P. Colombo, “Vitrification of Waste and Reuse of Waste-Derived Glass”, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, pp. 11581-11613, 2012.
- [4] P. Colombo, G. Brusatin, E. Bernardo y G. Scarinci, “Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 7, no. 3, pp.225-239, 2003. doi: 10.1016/j.cossms.2003.08.002
- [5] S. Çoruh y O. Ergun, “Leaching characteristics of copper flotation waste before and after vitrification”, *Journal of Environmental Management*, vol. 81, no. 4, pp. 333–338, 2006. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.11.006.
- [6] E. Bernardo, “Fast sinter-crystallization of a glass from waste materials”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.354, no. 29, pp.3486–3490, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2008.03.021>
- [7] S. Ali, A. Mohd y H. Mansor, “Toxicity immobilization of refinery sludge containing heavy metals via vitrification process”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 02, no. 10, pp.153-157, 2013. doi: 10.15623/ijret.2013.0210021
- [8] S. Varitis, P. Kavouras, E. Pavlidou, E. Pantazopoulou, G. Vourlias, K. Chrissafis, A. Zouboulis, T. Karakostas y P. Komninou, “Vitrification of incinerated tannery sludge in silicate matrices for chromium stabilization”, *Waste management*, vol. 59, pp. 237-246, 2017. doi: 10.1016/j.wasman.2016.10.011
- [9] X. Elias, *Residuos vitrificables*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [10] D. Bortoluzzi, L. Rodrigues y A. Bernardin, “Inertization of coal ashes by the vitrification technique: a mixture design approach”, *Mineral Processing & Extractive Metall.*, vol. 34, pp. 202–209, 2013. doi: 10.1080/08827508.2012.656778
- [11] M. Binhussain, M. Marangonib, E. Bernardob y P. Colombo, “Sintered and glazed glass-ceramics from natural and waste raw materials”, *Ceramics International*, vol. 40, pp. 3543–3551, 2014. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.09.074
- [12] G. Khater, “The use of Saudi slag for the production of glass-ceramic materials”, *Ceramics International*, vol. 28, pp. 59–67, 2002. doi: 10.1016/S0272-8842(01)00058-X
- [13] L. Barbieri, I. Lancellotti, T. Manfredini, I. Queralt, J. Rincon y M. Romero, “Design, obtainment and properties of glasses and glass–ceramics from coal fly ash”, *Fuel*, vol. 78, no. 2, pp. 271-276, 1999. doi: 10.1016/S0016-2361(98)00134-3
- [14] V. Gomes, C. D. G. De Borba, y H. G. Riella, “Production and characterization of glass ceramics from steelwork slag”, *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 12, pp. 2581–2585, 2002. doi: 10.1023/A:1015468329645
- [15] S. Hreglich, R. Falcone, G. Nasseti y G. Gattelli, “Inertisation of slags from the treatment of end of life automotive batteries and their reuse in the production of heavy clay products with soundproofing properties”, *Glass Technology-European Journal of Glass Science and Technology Part A*, vol. 49, no. 6, pp. 313-316, 2008.
- [16] M. Pelino, “Recycling of zinc-hydrometallurgy wastes in glass and glass ceramic materials”, *Waste Management*, vol. 20, no. 7, pp. 561–568, 2000. doi: 10.1016/S0956-053X(00)00002-7
- [17] J. Faber y T. Fawcett, “The powder diffraction file: present and future”, *Acta Crystallographica Section B: Structural Science*, vol. 58, no. 3, pp. 325-332, 2002. doi: 10.1107/S0108768102003312
- [18] M. Morris, H. McMurdie, E. Evans, B. Paretzkin, H. Parker, y N. Panagiotopoulos, “Section 18 - Data for 58 substances”, en *Standard X-ray diffraction powder patterns*, Washington, CD, 1981, pp. 1–105.
- [19] T. Naik, S. Singh y B. Ramme, “Performance and leaching assessment of flowable slurry”. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 127, no. 4, pp. 359-368, 2001. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:4(359)
- [20] R. Siddique, Y. Aggarwal, P. Aggarwal, E. Kadri y R. Bennacer, “Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand

- (UFS)", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1916-1925, 2011. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065
- [21] G. Singh, "Strength and Durability Studies of Concrete Containing Waste Foundry Sand", Disertación doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Thapar University, Patiala, India, 2012. doi: 10.13140/RG.2.2.18035.94240
- [22] H. M. Basar y N. Deveci Aksoy, "The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 508-515, 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.078
- [23] P. Iloh, G. Fanourakis y A. Ogra, "Evaluation of Physical and Chemical Properties of South African Waste Foundry Sand (WFS) for Concrete Use". *Sustainability*, vol. 11, no. 1, pp. 193, 2019. doi: 10.3390/su11010193
- [24] A. Deng y P. J. Tikalsky, "Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand", *Waste Manag.*, vol. 28, n.º. 11, pp. 2161-2170, 2008. doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.018
- [25] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*, México: Pearson Educación, 1997.
- [26] J. Fernández, *El Vidrio*, Madrid: CSIC-CSIC press, 2003.
- [27] O. Shalygina, G. Voronov, N. Kuryakin, A. Guzevataya y M. Gozha, "Increasing the energy efficiency of container-glass production by using mineral raw materials", *Glass and Ceramics*, vol. 73, pp. 170-174, 2016. doi: 10.1007/s10717-016-9849-0
- [28] F. Pahlevani y V. Sahajwalla, "From waste glass to building materials—An innovative sustainable solution for waste glass", *Journal of cleaner production*, vol. 191, pp. 192-206, 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.214
- [29] X. Fu, Y. Wang, S. Huang, X. Hou y W. Hou, "The influences of siliceous waste on blended cement properties", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 851-856, 2003. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01095-5
- [30] Y. Guney, Y. Sari, M. Yalcin, A. Tuncan y S. Donmez, "Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete", *Waste Management*, vol. 30, no. 8-9, pp. 1705-1713, 2010.
- [31] M. Etxeberria, C. Pacheco, J. M. Meneses, y I. Berridi, "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates", *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n.º. 9, pp. 1594-1600, 2010.
- [32] L. Gupta y A. Vyas, "Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder", *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 155-164, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203