

Activación alcalina de residuos industriales. Una alternativa para su reutilización en la construcción

Alkaline activation of industrial waste. An alternative for its reuse in construction

Resumen

Cada año, una cantidad significativa de vidrio reciclable se vierte en rellenos sanitarios a nivel mundial, lo que representa un problema ambiental al acumularse por tiempos prolongados. Por lo anterior, en este trabajo se estudió la influencia de los residuos de vidrio en la resistencia a la compresión de materiales obtenidos por activación alcalina de la mezcla de escoria de hierro y ceniza volante con hidróxido y silicato de sodio. La sustitución de 10, 20 y 30% de la ceniza volante por los residuos de vidrio incrementó su resistencia a la compresión hasta en 19.3% a 7 días, 17.8% a 14 días y 15.9% a 35 días con respecto a la mezcla de referencia, que contiene el 50% de escoria de hierro y 50% de ceniza volante. Los resultados obtenidos indicaron que, es posible utilizar los residuos de vidrio como un precursor parcial de la ceniza volante en estos materiales.

Palabras clave: residuos industriales, activación alcalina, materiales activados por álcali, resistencia a la compresión

Abstract

Every year, a significant amount of recyclable glass is disposed of in landfills worldwide, thus posing an environmental problem due to accumulation over extended periods of time. This is why, in this paper, the influence of glass residues on the compressive strength of materials obtained through alkaline activation, using hydroxide and sodium silicate, on a mixture of iron slag and fly ash, was studied. The replacement of 10, 20 and 30% of the fly ash, by glass waste, increased its compressive strength by up to 19.3% after 7 days; 17.8% after 14 days, and 15.9% after 35 days, compared to the reference mixture of 50% iron slag and 50% fly ash. The results indicated that it is possible to use glass residues as a partial precursor of fly ash in these materials.

Keywords: industrial waste, alkali activation, alkali activated materials, compressive strength

Tania Ariadna García Mejía

Universidad Nacional
Autónoma de México

**Rosa María
Ramírez Zamora**

Universidad Nacional
Autónoma de México

Fecha de recepción:
13 de marzo de 2023

Fecha de aceptación:
17 de abril de 2023

[https://doi.org/10.22201/
fa.2007252Xp.2023.27.85764](https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2023.27.85764)



Este trabajo está amparado por una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial, 4.0

Introducción

Las actividades que la industria lleva a cabo para satisfacer a la sociedad de consumo actual requieren energía y generan residuos. En este sentido, la ingeniera ambiental juega un papel importante en la mitigación del impacto que la industria genera en el medio ambiente, ya que, tiene como objetivo principal la creación de soluciones que permitan resolver problemas complejos en este ámbito. Por ejemplo, el sector de la construcción tiene un impacto ambiental intensivo, puesto que consume aproximadamente el 40% de los recursos naturales extraídos, representa el 12% del consumo mundial de agua, y es responsable del 45-60% de los residuos sólidos que se depositan en los vertederos.¹

Los residuos sólidos que se generan son variados y algunos son considerados de interés económico y reutilizados en la fabricación de nuevos materiales, como es el caso de los materiales activados alcalinamente o materiales activados por álcali (MAA). Los MAA son aglutinantes emergentes que han recibido gran interés debido a su permeabilidad baja (3 veces menor en comparación con el concreto a base de cemento Portland),² resistencia mecánica (resistencia a la compresión de 20-150 MPa),³ térmica (hasta 1,000 °C con una pérdida menor a 20% de su resistencia mecánica),² a la corrosión (sin formación de minerales de sulfato por lo que posee una mejor resistencia a la corrosión por sulfato), y durabilidad (la tasa de descomposición al 5% de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico es aproximadamente 1/13 o 1/12 de la tasa del cemento Portland a las mismas condiciones)⁴ similar o incluso mayor a la que exhibe el cemento Portland (CP) tradicional.^{5, 6} Estos materiales se obtienen de la activación alcalina de un precursor sólido. El precursor es un

¹ Karim Aligholizadeh Aghdam, Alireza Foroughi Rad, Hamed Shakeri y Javad Majrouhi Sardroud, "Approaching green buildings using eco-efficient construction materials: A review of the state-of-the-art", *J. Constr. Eng. Proj. Manag.*, 8, 2018, 1-23, <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2018.8.3.001>.

² Jihui Zhao, et al., "Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment", *Journal of Cleaner Production*, 307, 2021, 127085, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085>.

³ Priyanka Pradhan, et al., "Durability characteristics of geopolymer concrete-Progress and perspectives", *Journal of Building Engineering*, 59, 2022, 105100, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105100>.

⁴ H.S. Gökçe, M. Tuyan y M.L. Nehdi, "Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: A critical review", *Construction and Building Material*. 303, 2021, 124483, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124483>.

⁵ John L. Provis, "Alkali-activated materials", *Cement and Concrete Research*. 114, 2018, 40-48, doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009.

⁶ Susan A. Bernal y John L. Provis, "Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives", *Journal of the American Ceramic Society*, 97 (4), 2014, pp. 997-1008, <https://doi.org/10.1111/jace.12831>.

aluminosilicato, lo que ofrece la posibilidad de emplear diversos residuos y subproductos como materias primas. El activador es un álcali como el hidróxido de sodio o potasio. Tiene como función principal promover la disolución del precursor y la posterior polimerización de los diferentes productos de hidratación formados (similares al gel C-S-H formado de la hidratación del CP), responsables de su comportamiento mecánico.⁷ Los MAA tienen la ventaja de que se obtienen a temperatura ambiente a partir de precursores como ceniza volante, escorias metalúrgicas, vidrio, humo de sílice, lodo rojo o cenizas de biomasa, y requieren de un curado desde temperatura ambiente hasta 80 °C.⁸ La inclusión de residuos y subproductos como precursores se perfila como una solución viable para superar los efectos adversos de la generación de residuos, como son la falta de espacios para su adecuado almacenamiento a largo plazo, la contaminación de agua subterránea por lixiviación y la contaminación del aire.⁹

De acuerdo con la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (American Coal-Ash Association, ACAA), en 2021, se generaron 25.4 millones de toneladas. De las cuales, sólo se reutilizó 67.08%; principalmente en concreto, cemento, relleno estructural, carreteras y terraplenes.¹⁰ La ceniza volante (CV) es el residuo generado de la combustión de carbón, el cual es transportado en el torrente de gases de combustión y es captado mediante sistemas electrostáticos y filtros neumáticos.^{11,12} Su tamaño de partícula de entre 10 y 45 µm (80-90%) y composición química basada en óxidos de silicio y alu-

⁷ Manuel Torres Carrasco y Francisca Puertas, "La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros", *Revista Ingeniería de Construcción*, 32 (2), 2017, pp. 5-12, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>.

⁸ Tongsheng Zhang, Peng Gao, Pinhai Gao, Jiangxiong Wei y Qijun Yu, "Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials—An overview", *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 2013, pp. 134-143, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.003>.

⁹ Salmabanu Luhar, et al., "Valorisation of glass wastes for the development of geopolymer composites – Durability, thermal and microstructural properties: A review", *Construction and Building Materials*, 222, 2019, pp. 673-687, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.169.

¹⁰ American Coal-Ash Association (ACAA), "2021 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report", <https://aca-usa.org/wp-content/uploads/2022/12/2021-Production-and-Use-Survey-Results-FINAL.pdf>, consultado 23 de febrero de 2023.

¹¹ American Concrete Institute, *ACI Concrete Terminology, An ACI standard*, 2013, https://www.concrete.org/portals/0/files/pdf/aci_concrete_terminology.pdf, Consultado el 28 de febrero de 2023.

¹² Comisión Federal de Electricidad, *Integración de estudios de selección de sitios para disposición de cenizas*, 1996, <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/n/10000-19.pdf>, consultado el 28 de febrero de 2023.

minio reactivos ($> 40\%$, $\geq 18\%$, respectivamente) hacen de la cv un precursor adecuado para la activación alcalina.^{13,14} En México, donde 4.2% de la energía se genera con carbon,¹⁵ únicamente se aprovecha entre 0.8 y 16% de la ceniza volante.¹⁴ Por esta razón, se considera un candidato idóneo para ser reutilizado en la elaboración de MAA. En la fundición del hierro y el acero se generan escorias como subproductos, que representan del 70% al 85% del desperdicio sólido de la industria siderúrgica con una producción global estimada entre 440 y 680 millones de toneladas al año.^{16,17} Sus características dependen de su proceso de obtención (alto horno, arco eléctrico, básico al oxígeno) y del método que se utiliza para su enfriamiento (agua, vapor, aire comprimido), lo que determina su tamaño de partícula, composición química y mineralógica, porosidad, densidad y contenido de fases cristalinas.¹⁸ Lo anterior, permite un abanico amplio de aplicaciones, por lo que un porcentaje alto es aprovechado como material cementante suplementario (MCS) del CP, agregado ligero en concreto, agregado grueso para carpeta asfáltica, balastro y fertilizantes.¹⁹ En el caso de los residuos de vidrio (RV), también exhiben una alta tasa de generación y acumulación, debido a su consumo intensivo y baja reutilización/reciclado.^{19,20} Más de 85% de la producción mundial de vidrio (130 millones de toneladas en 2018)

¹³ Mariela Rendón Belmonte, Donato Sánchez Topete, Miguel Martínez Madrid y Abraham López Miguel, *Caracterización fisicoquímica de concretos con contenidos del 30% de ceniza volante*, Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica No. 618, 2021, pp. 3-4, <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt618.pdf>.

¹⁴ Ana María Fernández Jiménez y Ángel Palomo, "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements", *Fuel*, 82 (18), 2003, pp. 2259–2265, doi:10.1016/s0016-2361(03)00194-7.

¹⁵ Comisión Federal de Electricidad (2022) *Informe Anual 2021*, https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/65/1/2022-05-11-1/assets/documentos/CFE_Informe_Anuar_2021.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

¹⁶ V. V. Temnikov, O. O. Sheshukov, M. A. Mikheenkoy y A. A. Metelkin. "Ladle-Furnace-Slag Reprocessing at Evraz Nizhnii Tagil Iron and Steel Works OJSC", *Metallurgist* 64, 2020, pp. 508-513, <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01020-w>.

¹⁷ United States Geological Survey (2023), "Iron and Steel Slag", Statistics and Information for the year 2023, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-steel-slag.pdf>, consultado el 28 de febrero de 2023.

¹⁸ Nadine M. Piatak, Michael B. Parsons y Robert R. Seal II, "Characteristics and environmental aspects of slag: A review", *Applied Geochemistry*, 57, 2015, pp. 236-266, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>.

¹⁹ James O'Connor, *et al.*, "Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review", *Journal of Hazardous Materials*, 419, 2021, 126478, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>.

²⁰ Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon y Hau-Wing Wong, "Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, 70, 2013, pp. 25-31, doi:10.1016/j.resconrec.2012.10.006.

proviene de la fabricación de envases y vidrio plano.²¹ En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales estimó en sus estadísticas que, en el año 2012, se recolectaron aproximadamente 22,600 toneladas de vidrio como material valorizable,²² de los cuales únicamente se reutilizó 23.5%,²³ un porcentaje que es consistente con la tendencia global.²⁴ Por su composición química de 56-70% de SiO_2 , 6-12% de CaO , 0.5-5% de Al_2O_3 , 12-15% de Na_2O y 0.1-3% de Fe_2O_3 , son considerados residuos urbanos, los cuales son utilizados en la industria de la construcción como reemplazo de arena natural en el concreto, material de relleno para las bases de carreteras y como material cementante suplementario, debido principalmente a su composición química y propiedad puzolánica.⁹

En consecuencia, estudios e investigaciones centradas en nuevos materiales ecológicos y sustentables para la industria de la construcción son cruciales para reducir los problemas ambientales asociados con esta industria masiva y con la acumulación de residuos sólidos. Por lo tanto, uno de los grandes retos de la industria de la construcción y la arquitectura se centra en la reutilización de residuos. Se ha demostrado que los MAA basados en escoria y ceniza volante presentan propiedades mecánicas y durabilidad comparables, e incluso superiores, con el CP. Sin embargo, estos precursores están disponibles localmente en algunos países. En consecuencia, se han estudiado otros residuos como el vidrio, cenizas de cáscara de arroz y cenizas de aceite de palma.²⁵

²¹ Yiwei Liu, Caijun Shi, Zuhua Zhang y Ning Li, "An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials", *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 2019, pp. 297-309. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>.

²² Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012), *Reporte de reciclaje de residuos sólidos urbanos para el año 2012*, <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indicadores-de-crecimiento-verde--producción-y-consumo>, consultado el 27 de febrero de 2023.

²³ Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, "Residuos" (cap. 7), 2015, https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

²⁴ United States Environmental Protection Agency, *Advancing Sustainable Materials Management*, "Fact Sheet", 2018, https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-11/documents/2018_ff_fact_sheet.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

²⁵ Areej T. Almalkawi, Anagi Balchandra y Parviz Soroushian, "Potential of Using Industrial Wastes for Production of Geopolymer Binder as Green Construction Materials", *Construction and Building Materials*, 220, 2019, pp. 516-524, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.054>.

Recientemente, los residuos de vidrio se han utilizado como precursores parciales, con el objetivo de aumentar su reutilización.^{26, 27} Por lo anterior, en el presente trabajo se estudió la sustitución de ceniza volante por residuos vidrio y su impacto en la resistencia a la compresión en pastas de MAA basados en escoria hierro y ceniza volante locales.

Materiales

Para la preparación de las pastas se utilizaron como precursores escoria de hierro (EAH), ceniza volante (CV) y vidrio (RV) (Figura 1). La escoria utilizada corresponde a una escoria de hierro de alto horno, obtenida de una las principales empresas siderúrgicas de México (Monclova, Coahuila). La ceniza volante se obtuvo de CFE Generación IV (Petacalco, Guerrero) y los residuos de vidrio provienen del producto rechazado de la producción de envases y botellas (Grupo Pavis, Edo. México). Como activador alcalino se utilizó una disolución de hidróxido de sodio (J.T. Baker, 97%) y silicato de sodio



Figura 1. Residuos utilizados como precursores.
Fuente: elaboración propia.

²⁶ P. Manikandan y V. Vasugi, "Potential utilization of waste glass powder as a precursor material in synthesizing ecofriendly ternary blended geopolymers matrix", *Journal of Cleaner Production*, 355, 2022, 131860, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131860>.

²⁷ Guangwei Liang, *et al.*, "Reuse of waste glass powder in alkali-activated metakaolin/fly ash pastes: Physical properties, reaction kinetics and microstructure", *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 2021, 105721, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105721>.

(Barsa S-42, 9.2% de Na_2O , 29.9% de SiO_2). Para obtener una muestra representativa de cada residuo se utilizó el Método de cuarteo NMX-AA-15-1992. Posteriormente, los residuos fueron sometidos a un proceso de acondicionamiento (Figura 2). En el caso particular de los RV, previamente fueron lavados con agua y detergente



Figura 2. Proceso de acondicionamientos de los residuos.

Fuente: elaboración propia.

extran (eliminación de arena, grasa y polvo). El proceso de acondicionamiento consistió en un secado a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (horno Thermo Scientific Precision) hasta peso constante, seguido de un proceso de molienda en un molino de bolas de acero (TECAN QM-5), sólo para el caso de los RV y EAH, y un tamizado a malla No. 325 (Tyler) empleando un tamizador analítico (Retsch AS 200). Después del proceso de tamizado se realizó su análisis granulométrico por difracción láser (difractómetro Mastersizer 2000, $0.02\text{-}2000\text{ }\mu\text{m}$, Malvern Instruments). La composición química de cada uno de los residuos fue obtenida por fluorescencia de rayos X (FRX), empleando un espectrómetro secuencial de rayos X, Rigaku Primus II con tubo generador de rayos X de rodio y ventana de berilio de $125\text{ }\mu\text{m}$. Por difracción de rayos X de polvos (DRX) se determinó su composición mineralógica y se identificó la presencia de material amorfo. Para su análisis por DRX se utilizó un difractómetro Empyrean con filtro de níquel, $\lambda_{\text{Cu}}=1.5406\text{ \AA}$, detector PIXcel3D, a 45 kV y 40 mA , un tamaño de paso de 0.002° (2θ) y un tiempo de integración de 50 s/paso en un intervalo de 5 a 60° de 2θ .

Desarrollo experimental

Para estudiar la influencia de los RV en la resistencia a la compresión de MAA basados en EAH y CV se diseñaron y evaluaron diferentes proporciones (Figura 3), manteniendo constante los siguientes pa-

Mezcla	% EAH	% CV	% RV
MAA ₀	50	50	0
MAA ₁₀	50	40	10
MAA ₂₀	50	30	20
MAA ₃₀	50	20	30
* % en masa			

Figura 3. Proporciones de las mezclas para la preparación de las pastas de MAA.

Fuente: elaboración propia.

rámetros: relación en masa líquido/sólido de 0.4, relación molar Si/Al de 3.0 y la cantidad de EAH (50% en masa). Las pastas fueron preparadas a partir de la mezcla de los residuos y el activador alcalino en una mezcladora (JJ-5 cement mortar mixer) durante 5 min. Con la pasta obtenida se elaboraron tres probetas, que posteriormente se utilizarán en las pruebas de resistencia a la compresión. En este caso, la pasta fue colocada en los moldes cilíndricos (altura:diámetro 2:1, 48 mm x 24 mm) y posteriormente vibrados en un agitador tipo vórtice (Glas-Col Multi-Pulse Vortex) por 10 min. Finalmente, las probetas obtenidas fueron sometidas a un proceso de curado durante 7, 14 y 35 días a temperatura ambiente (22 ± 2 °C). Las pruebas de resistencia a compresión simple se realizaron en un marco de carga dinámica MTS 25t (precarga de 3 kg y una carga por desplazamiento a una velocidad constante de 5 mm/min) instalado en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del II-UNAM.

Óxido (% masa)	EAH	CV	RIV
SiO ₂	39.24	60.72	71.81
TiO ₂	0.489	0.881	0.131
Al ₂ O ₃	9.21	20.29	1.58
Fe ₂ O ₃	0.76	7.423	0.57
MnO	0.124	0.042	0.006
MgO	10.65	1.30	0.98
CaO	39.33	1.35	9.70
Na ₂ O	0.339	0.784	14.46
K ₂ O	0.319	1.99	0.478
P ₂ O ₅	0.007	0.185	0.003
PXC*	-0.480	5.04	0.26
Total	99.99	100.00	99.98

*PXC= pérdida por calcinación

Figura 4. Composición química de los residuos por FRX.

Fuente: elaboración propia.

Resultados

En la Figura 5 se presenta la curva de distribución de tamaño de partícula de cada uno de los residuos. Los resultados indicaron un tamaño de partícula d_{50} de 14.909 μm para la CV. Los RV y la EAH, después del proceso de molienda, presentaron un tamaño de partícula d_{50} de 17.917 μm y 11.690 μm , respectivamente. El análisis

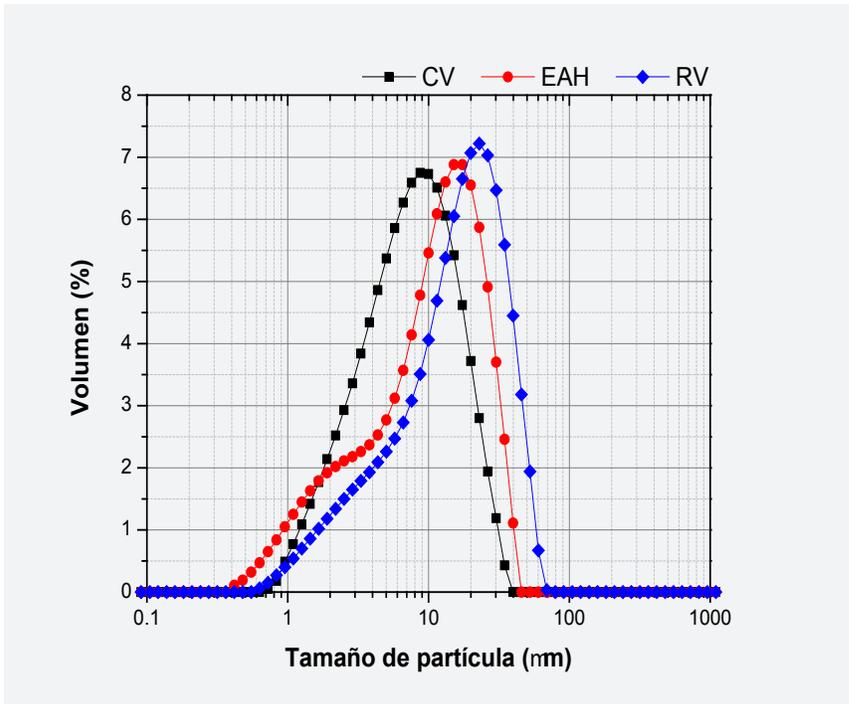


Figura 5. Distribución de tamaño de partícula de los residuos.

Fuente: elaboración propia.

químico por FRX muestra que los residuos están constituidos principalmente por SiO_2 (39-72% en masa) con proporciones variables de Al_2O_3 (1.5-20% en masa), CaO (1.3-39% en masa) y Na_2O (0.3-14.5% en masa). En la Figura 4 se observa que la CV tiene un contenido de CaO menor a 10%, la suma del porcentaje de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ mayor a 70% y una PXC de 5.04 indican que la CV corresponde a una ceniza volante tipo F, de acuerdo con las especificaciones establecidas en la Norma ASTM C 618.²⁸ La pérdida por calcinación (PXC) es un parámetro importante en la CV, cuando este valor es mayor a 12%, se tiene un incremento en la demanda de líquido en la mezcla;

²⁸ American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete". <https://civiledu.co/2021/09/08/astm-c-618-03-pdf-free-download/>

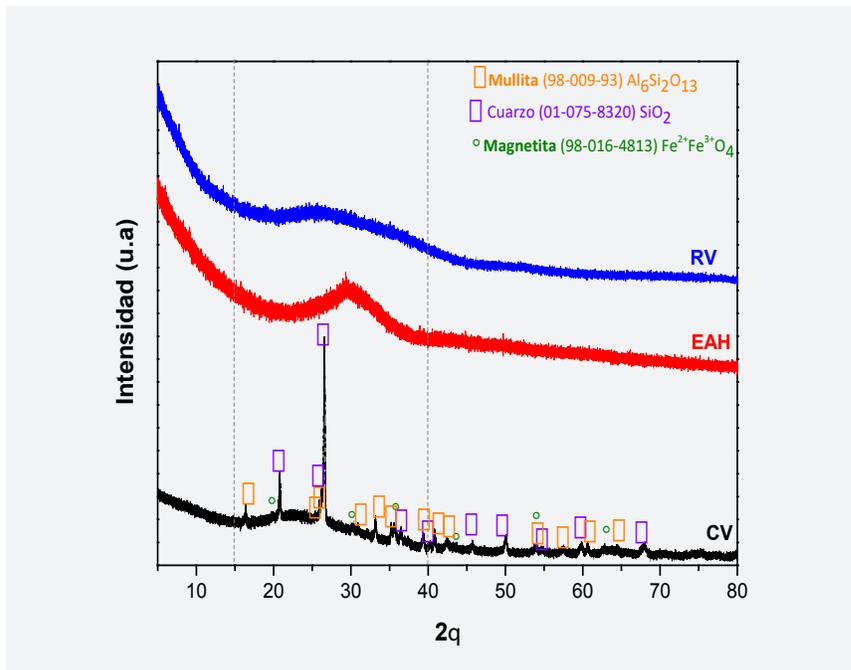


Figura 6. Difractogramas de los residuos utilizados como precursores.

Fuente: elaboración propia.

lo que se traduce en un fraguado lento.^{29, 30} En el caso de los RV, el contenido alto en SiO₂ (39.24%), Na₂O (14.46%) y CaO (9.70), los clasifica como residuos de vidrio tipo sódico cálcico. A diferencia de la CV y los RV, la EAH tiene un mayor contenido en CaO. En este caso, su composición química es similar a la observada para otras escorias de hierro, donde su composición química está basada principalmente en SiO₂, Al₂O₃ y CaO, con valores en el intervalo de 26.6-46.6%, 5.86-41.2% y 0.15-93.4%, respectivamente.¹⁸

El análisis por DRX confirmó la naturaleza amorfa de los RV y la EAH, sin la presencia de fases cristalinas (Figura 6). En la Figura 4, se observa que la CV está constituida por una fase amorfa en menor proporción, identificada por el levamiento de la línea base y la presencia de un halo amplio de 15-40° de 2θ en el patrón de difracción. Los máximos de difracción o picos identificados en la CV corresponden a las fases cristalinas de Cuarzo, Mullita y Magnetita, lo que es consistente con su análisis químico por FRX.

²⁹ Camilo Andrés Chávez Velásquez y Yohana Liz Guerra Maestre, *Producción, propiedades y uso de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero*, tesis de licenciatura en ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2015, p. 130, <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9685/ChavezCamilo2015.pdf?sequence=1>, consultado el 28 de febrero de 2023.

³⁰ Javed I. Bhatti, Luis A. Graf, F. M. Miller y John Gajda, *La ceniza volante con alto contenido de carbón y de cemento*, <https://www.imcyc.com/cyt/septiembre03/ceniza.htm>, consultado el 28 de febrero de 2023.

Resistencia a la compresión

En la Figura 7 se muestra la configuración de las pruebas de resistencia a compresión simple para los MAA. Particularmente, en la Figura 5.d se muestra la falla que presentaron las probetas. Este tipo de falla se produce cuando se alcanza una carga uniformemente distribuida en el material sometido a compresión.

En la Figura 8 se presentan los valores promedio de tres probetas para cada MAA a 7, 14 y 35 días. La gráfica muestra la evolución de la resistencia en función del tiempo, observándose un incremento con paso del tiempo. En todos los casos, la resistencia máxima se alcanza alrededor de los 35 días. A 7 días, los MAA de EAH/CV (MAA_0) mostraron una resistencia de 23.7 MPa, mientras que los MAA con 10%, 20% y 30% de RV (MAA_{10} , MAA_{20} , MAA_{30}) exhibieron una resistencia de 26.1, 28.2 y 29.4 MPa, respectivamente. A 14 días exhibieron resistencias de 34.30, 38.07 y 40.27 MPa, y a 35 días de 40.22, 42.06 y 44.26 MPa. Lo que indica un incremento de su resistencia hasta en un 19.3% cuando se sustituye 30% de la CV con RV; mientras que a 14 y 35 días, se tiene aumento del 17.8% y del 15.9%, respectivamente. Este incremento en la resistencia, se debe principalmente a que los RV se disuelven en medios altamente alcalinos ($pH > 13$),



7a



7b



7c



7d

Figura 7a y 7b, configuración de las pruebas de resistencia a compresión simple; 7c y 7d, probetas de MAA después de las pruebas de resistencia.

Fuente: elaboración propia.

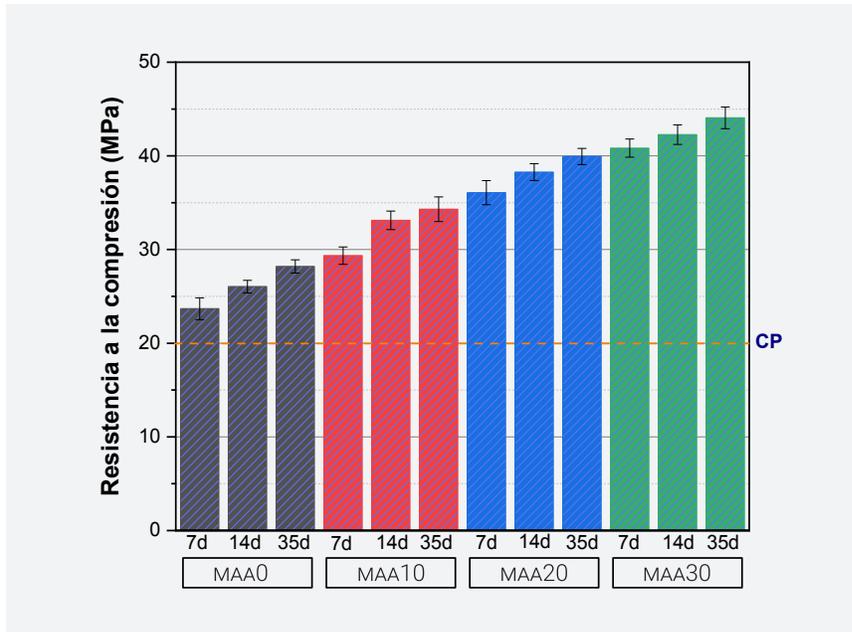


Figura 8. Resistencia a la compresión de las pastas de MAA.

Fuente: elaboración propia.

lo que proporciona una cantidad de sílice soluble disponible en las etapas iniciales de la activación alcalina.³¹

La caracterización de los residuos por FRX y DRX demostró su potencial como precursores para el proceso de activación alcalina en la obtención de materiales activados por álcali con resistencias a la compresión mayores en comparación con el CP (cemento Portland ordinario, CPO 20, 20 MPa, 28 días).³²

Conclusiones

Los valores de resistencia a la compresión sugieren que los residuos de vidrio utilizados en porcentajes del 10 al 30% (en masa) son una alternativa como precursores parciales de ceniza volante en pastas de MAA obtenidos por activación alcalina de una mezcla de escoria de hierro y ceniza volante. Con una sustitución de 30% de cv por RV, los MAA exhibieron una resistencia máxima a la compresión de 40.22, 42.06 y 44.26 MPa a 7, 14 y 35 días. De tal forma que la adición de 30% de residuos de vidrio en los MAA basados en EAH/cv incrementó su resistencia hasta en 19.3, 17.8 y 15.9% respectivamente, convir-

³¹ Manuel Torres-Carrasco, Carlos Rodríguez-Puertas, María del Mar Alonso y Francisca Puertas, "Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour", *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54 (2), 2015, pp. 45-57, doi:10.1016/j.bsecv.2015.03.004.

³² Norma N-CMT-2-02-001/02, "Calidad del cemento Portland", <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>, consultado el 11 de febrero de 2023.

tiéndolos en un material competitivo. El empleo conjunto de estos tres residuos impulsa su reutilización como materias primas en la elaboración de conglomerantes alternativos al cemento Portland. Todos los sistemas estudiados presentaron mejor resistencia a la compresión a 7 días que la que el cemento Portland ofrece a 28 días, por lo que este tipo de materiales podría emplearse en la fabricación de morteros y concretos con propiedades prometedoras. Finalmente, la escoria de alto horno, la ceniza volante y los residuos de vidrio son precursores locales adecuados en la elaboración de MAA.

Referencias

Bibliografía

- AGHDAM, K. A., A. F. RAD, H. SHAKERI Y J. M. SARDROUD
 2018 "Approaching green buildings using eco-efficient construction materials: A review of the state-of-the-art", *J. Constr. Eng. Proj. Manag.*, 8, pp. 1-23, <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2018.8.3.001>.
- ALMALKAWI, A. T., A. BALCHANDRA, Y P. SOROUSHIAN
 2019 "Potential of Using Industrial Wastes for Production of Geopolymer Binder as Green Construction Materials", *Construction and Building Materials*, 220, pp. 516-524, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.054>.
- AMERICAN COAL-ASH ASSOCIATION (ACAA)
 2021 "2021 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report", <https://aca-usa.org/wp-content/uploads/2022/12/2021-Production-and-Use-Survey-Results-FINAL.pdf>, consultado 23 de febrero de 2023.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE
 2013 Concrete Terminology, An ACI standard, https://www.concrete.org/portals/0/files/pdf/aci_concrete_terminology.pdf, consultado el 28 de febrero de 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", ASTM C 618-03. <https://civiledu.co/2021/09/08/astm-c-618-03-pdf-free-download/>
- BERNAL, S. A., Y J. L. PROVIS
 2014 "Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives", *Journal of the American Ceramic Society*, 97 (4), pp. 997-1008, <https://doi.org/10.1111/jace.12831>.
- BHATTY, J. I., L. A. GRAF, F. M. MILLER Y J. GAJDA
La ceniza volante con alto contenido de carbón y de cemento, <https://www.imcyc.com/cyt/septiembre03/ceniza.htm>, consultado el 28 de febrero de 2023.
- CHÁVEZ VELÁSQUEZ, C. A. E Y. L. GUERRA MAESTRE
 2015 Producción, propiedades y uso de los residuos de la com-

bustión del carbón de termotasajero, tesis de licenciatura en ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2015, p. 130, <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9685/ChavezCamilo2015.pdf?sequence=1>, consultado el 28 de febrero de 2023.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

- 1996 *Integración de estudios de selección de sitios para disposición de cenizas*, <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/n/10000-19.pdf>, consultado el 28 de febrero de 2023.
- 2022 *Informe Anual 2021*, https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/65/1/2022-05-11-1/assets/documentos/CFE_Informe_Anual_2021.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., Y A. PALOMO

- 2003 "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkali-cements", *Fuel*, 82 (18), 2259-2265, doi:10.1016/s0016-2361(03)00194-7.

GÖKÇE H. S., M. TUYAN Y M. L. NEHDI

- 2021 "Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: A critical review", *Construction and Building Materials*, 303, 124483, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124483>.

LIANG, G., H. LI, H. ZHU, T. LIU, Q. CHEN Y H. GUO

- 2021 "Reuse of waste glass powder in alkali-activated metakaolin/fly ash pastes: Physical properties, reaction kinetics and microstructure", *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105721, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105721>.

LING, T.-C., C.-S. POON Y H.-W. WONG

- 2013 "Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, 70, 25–31. doi:10.1016/j.resconrec.2012.10.006

LIU, Y., C. SHI, Z. ZHANG Y N. LI

- 2019 "An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials", *Resources, Conservation and Recycling*, 144, pp. 297-309, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>.

LUHAR, S., T.-W. CHENG, D. NICOLAIDES, I. LUHAR, D. PANIAS Y K. SAKKA

2019 "Valorisation of glass wastes for the development of geopolymer composites – Durability, thermal and microstructural properties: A review", *Construction and Building Materials*, 222, pp. 673-687, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.169.

MANIKANDAN P., Y V. VASUG

2022 "Potential utilization of waste glass powder as a precursor material in synthesizing ecofriendly ternary blended geopolymer matrix", *Journal of Cleaner Production*, vol. 355, 131860, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131860>.

NORMA N-CMT-2-02-001/02

"Calidad del cemento Portland", <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>, consultado el 11 de febrero de 2023.

O'CONNOR, J., ET AL.

2021 "Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 419, 126478, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>.

PIATAK, N. M., M. B. PARSONS Y R. R. SEAL

2015 "Characteristics and environmental aspects of slag: A review", *Applied Geochemistry*, vol. 57, pp. 236-266, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>.

PRADHAN, P., S. DWIBEDY, M. PRADHAN, S. PANDA Y S. K. PANIGRAHI

2022 "Durability characteristics of geopolymer concrete – Progress and perspectives, *Journal of Building Engineering*", vol. 59, 105100, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105100>.

PROVIS, J. L.

2018 "Alkali-activated materials", *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 40-48, doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009.

RENDÓN BELMONT M., D. SÁNCHEZ TOPETE, M. MARTÍNEZ MADRID

Y A. LÓPEZ MIGUEL

2021 *Caracterización fisicoquímica de concretos con contenidos del 30% de ceniza volante*, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica núm. 618, pp. 3-4, <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt618.pdf>.

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

- 2012 *Reporte de reciclaje de residuos sólidos urbanos para el año 2012*, <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indicadores-de-crecimiento-verde--producción-y-consumo>, consultado el 27 de febrero de 2023.
- 2015 *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, "Residuos"* (cap. 7), 2015, https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

TEMNIKOV, V. V., ET AL.

- 2020 "Ladle-Furnace-Slag Reprocessing at Evraz Nizhnii Tagil Iron and Steel Works OJSC", *Metallurgist*, 64, pp. 508-513, <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01020-w>.

TORRES CARRASCO, M., C. RODRÍGUEZ-PUERTAS, M. DEL M. ALONSO Y F. PUERTAS

- 2015 "Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour", *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 54, núm. 2, pp. 45-57, doi:10.1016/j.bsecv.2015.03.004.

TORRES CARRASCO, M., Y F. PUERTAS

- 2017 "La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros", *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 32, núm. 2, pp. 5-12, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2023)

- "Iron and Steel Slag", *Statistics and Information for the year 2023*, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-steel-slag.pdf>, consultado el 28 de febrero de 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

- Advancing Sustainable Materials Management*, "Fact Sheet", 2018, https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-11/documents/2018_ff_fact_sheet.pdf, consultado el 27 de febrero de 2023.

ZHANG, T., P. GAO, P. GAO, J. WEI Y Q. YU

2013 Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 74, pp. 134-143, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.03.003.

ZHAO, J., ET AL.

2021 "Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment", *Journal of Cleaner Production*, 307, 127085, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085>.

Tania Ariadna García Mejía

Instituto de Ingeniería
Coordinación de Ingeniería Ambiental

TGarciaM@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9701-844X>

Es investigadora asociada C en el Instituto de Ingeniería y profesora de asignatura en la Facultad de Química, UNAM. Es química, maestra (mención honorífica) y doctora en Ciencia e Ingeniería de Materiales por la UNAM. Realizó estancias posdoctorales en el Instituto de Ingeniería y en el Instituto de Física, UNAM. Su línea de investigación se centra en la valorización de residuos para aplicaciones ambientales y en ingeniería civil.

Rosa María Ramírez Zamora

Instituto de Ingeniería
Coordinación de Ingeniería Ambiental

RRamirezZ@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1129-4385>

Es investigadora definitiva Titular B en el Instituto de Ingeniería, UNAM. Es ingeniera química por la UNAM, maestra en ingeniería sanitaria y doctora en ciencias químicas (especialidad en tratamiento de aguas) por la Université de Rennes 1 Bretagne, Francia. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, SNI-CONACYT, nivel II. Entre sus líneas de investigación se encuentra la valorización de residuos industriales para tratamiento de agua y aire. Ha recibido diversos premios y reconocimientos, entre los que se encuentran: Premio León Bialik (2011), Premio a la Innovación Cemex (2014), Premio León y Pola Bialik a la Innovación Tecnológica (2016).

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, UNAM-DGAPA, proyecto PAPIIT IT100621. A la Dra. Alexandra Ossa López por las facilidades otorgadas para la realización de los experimentos y al Dr. Mario Flores Guzmán por su apoyo técnico en el Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería (II-UNAM). Al Laboratorio de DRX y FRX del Instituto de Geología (IG-UNAM) pertenecientes al Laboratorio Nacional de Mineralogía y Geoquímica de México, en especial a la Dra. Teresa Pi Puig y al Q. Rufino Lozano Santa Cruz. Al Laboratorio de Estructuras y Materiales del II-UNAM para la realización de las pruebas de resistencia mecánica, en especial al Dr. Marcos Mauricio Chávez y al Ing. Yusef Zavalza Cabello. Finalmente, se agradece a los estudiantes de licenciatura Emmanuel Rosas García y Josué Fernando Ramos Moreno por su apoyo en el acondicionamiento de los residuos y la elaboración de las probetas.