

Evaluación de la formación de andradita y carbonatos de calcio durante la síntesis de un geopolímero a partir de escoria blanca y negra

Evaluation of the formation of andradite and carbonates of calcium in the synthesis of a geopolymer from white slag

Juan Ochoa-Franco^{1a}, Alfonso López-Díaz^{1b}

¹Grupo de Investigación en Materiales Siderúrgicos, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. Orcid: ^b 0000-0002-2983-7352.

Correos electrónicos: ^a juanesteban.ochoa@uptc.edu.co, ^b alfonso.lopez@uptc.edu.co

Recibido: 20 enero, 2020. Aceptado: 27 mayo, 2020. Versión final: 5 julio, 2020.

Resumen


En este artículo se evalúa la influencia de la andradita en la resistencia mecánica de un geopolímero sintetizado a partir de escoria blanca de horno convertidor y escoria negra de horno eléctrico. Como activadores se utilizó hidróxido de sodio 12 M y silicato de sodio 5 M. El hidróxido de sodio se mantuvo constante en 5% y en 15% en silicato de sodio. Se añadió material cerámico en proporciones del 5%, 10%, 15% y 20%. El curado de la pasta se hizo a temperatura ambiente durante 24 horas. El tamaño de partículas de la escoria blanca y del material cerámico fue de 150 µm. Se utilizó XDR y MEB para analizar los posibles mecanismos de formación de la andradita y del carbonato de calcio. Se fallaron las muestras en la máquina universal de ensayos. Se determinó la influencia de los compuestos químicos formados en la resistencia a la compresión. Los resultados indican que las condiciones propuestas son adecuadas para la formación de estructuras cristalinas propias de los materiales geopoliméricos.

Palabras clave: geopolímeros; escoria blanca; hidróxido de sodio; carbonatación.

Abstract

In this article, the influence of the andradite on the mechanical resistance synthesized from the furnace slag converter is evaluated. As activators, 12 M sodium hydroxide and 5 M sodium silicate were used. Sodium hydroxide remained constant at 5% and at 15% in sodium silicate. Ceramic material was added in proportions of 5%, 10%, 15% and 20%. The curing of the paste was done at room temperature for 24 hours. The particle size of the white slag and the ceramic material was 150 µm. XDR and MEB were used to analyze the possible mechanisms of formation of andradite and calcium carbonate. Samples were failed in the universal testing machine. The influence of the chemical compounds formed on the compressive strength was determined. The results indicate that the proposed conditions are suitable for the formation of crystalline structures characteristic of geopolymeric materials.

Keywords: geopolymers, white slag, sodium hydroxide, carbonatation.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: J. Ochoa-Franco, A. López-Díaz, "Evaluación de la formación de andradita y carbonatos de calcio durante la síntesis de un geopolímero a partir de escoria blanca y negra," *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 4, pp. 27-36, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020003>

1. Introducción

La elevada emisión de CO₂ relacionada con la producción de cemento Portland ha provocado gran interés en la sustitución de este cemento, por otro tipo de materiales en los que se eliminen o se reduzcan las emisiones contaminantes a la atmosfera.

Desde este punto de vista los geopolímeros pretenden ser el material que reemplace en un futuro al cemento Portland, alcanzando resistencias mecánicas superiores, además de ser más económica su producción [1,2].

La mayoría de los investigadores han trabajado ceniza volante, y en sus resultados han logrado resistencias a la compresión de hasta 40 MPa [3,4]; además de presentar un excelente comportamiento frente al fuego [5,6], incrementando la seguridad de estos materiales expuestos al fuego durante 2 horas, que comparados con los cementos Portland presentan una disminución de las grietas y mayor transferencia de calor durante la exposición del material.

Otros investigadores han optado por sustituir parcialmente la ceniza volante por escoria [7,8], donde alcanzaron 30 Mpa en resistencia a la compresión cuando se dejó curar durante 90 días, pero en las que se deben tener precauciones sobre las aplicaciones a altas temperaturas puesto que la escoria puede aumentar las fisuras en el material [9, 10, 11].

Los geopolímeros se obtienen a partir de la mezcla en óptimas proporciones de un mineral basado en SiO₂ y Al₂O₃ (precursor) con un agente químico (activador alcalino), formado de un producto con características cementantes [12]. Los activadores son soluciones altamente alcalinas, constituidas por NaOH, KOH y LiOH, donde el ion alcalino tiene un efecto en la reestructuración de los materiales con SiO₂ y Al₂O₃ amorfo [13].

Las estructuras cristalinas características de los geopolímeros son la illita, la cristobalita y la andradita, dado que este tipo de estructuras son las responsables de elevar la resistencia de los materiales en los cuales se encuentra presente [14,15].

En el presente trabajo se estudia la formación de un material con excelentes propiedades mecánicas en las que se observó carbonatación y formación de estructuras cristalinas propias de los materiales geopoliméricos, además, se estudia los posibles mecanismos de formación y su influencia en la resistencia mecánica a la compresión, con el fin de analizar sus posibles aplicaciones en la industria de la construcción, como

material mampuesto que reemplace al ladrillo tradicional que cumpla con normas internacionales de resistencia a compresión.

2. Parte experimental

La parte experimental incluyó la manufactura de 3 mezclas, constituidas por 1 mezcla de escoria blanca, 1 mezcla de escoria negra y 1 mezcla de escoria blanca combinada con escoria negra, con diferentes proporciones en peso de hidróxido de sodio, silicato de sodio y RC. Los ensayos se realizaron sobre 44 muestras cilíndricas de 25mm de diámetro x 50 mm de altura.

2.1. Materiales

En este estudio se utilizó escoria blanca y escoria negra provenientes de la empresa Sidenal S.A (Colombia). En la Figura 1 se muestra su distribución granulométrica, el RC proveniente de desechos de teja de arcilla. La caracterización de estos materiales se realizó mediante Fluorescencia de Rayos X, su composición química se resume en la tabla 1, como agregado fino se utilizó el residuo cerámico con un tamaño de grano 150 μm y absorción del 7%.

La escoria blanca enfriada del horno convertidor fue seleccionada aleatoriamente y se trasladó al laboratorio donde se caracterizó por difracción de rayos x y fluorescencia de rayos x, según se muestra en (ver figura 2) y (ver Tabla 1).

Posteriormente se preparó mecánicamente hasta obtener un tamaño de partícula de 150 μm, en un tamiz de malla número 100. Se preparó hidróxido de sodio con una concentración 12 M (ver Figura 3), el silicato de sodio se preparó con una concentración 5 M.

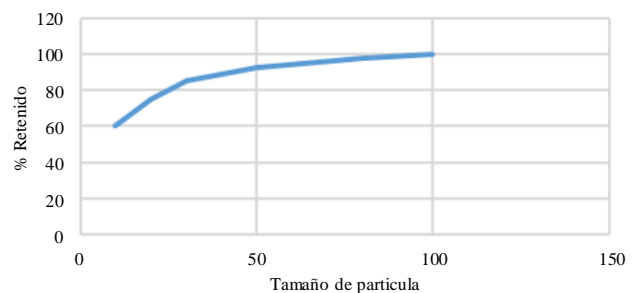


Figura 1. Distribución granulométrica de la escoria blanca del horno convertidor. Fuente: elaboración propia.

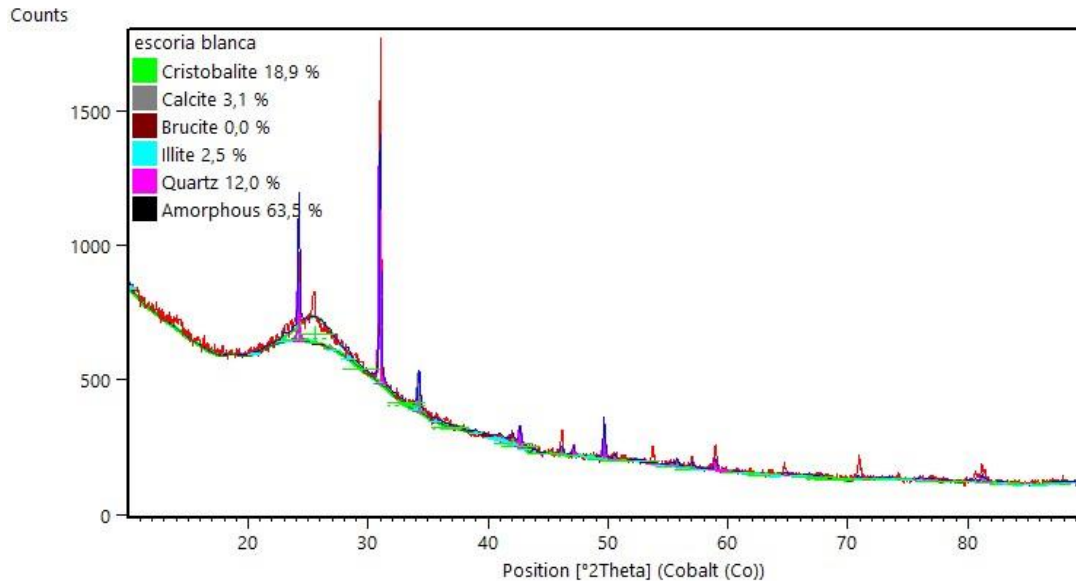


Figura 2. Difracción de rayos X escoria blanca. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Composición química de los materiales empleados

Fluorecencia de rayos X		
Compuesto	Escoria blanca en %	Residuo Ceramico en %
SiO ₂	23,51	52,91
Al ₂ O ₃	6,37	25,70
F ₂ O ₃	3,8	6,93
Mn ₂ O ₃	3,63	
CaO	46,1	0,543
Mg ₂ O	13,28	0,543
K ₂ O	<0,01	1,428
P ₂ O ₅	<0,01	0,021
Na ₂ O	0,05	<0,01
SO ₃	0,39	1,129

Fuente: elaboración propia.

2.2. Preparación de la muestra

Se prepararon 3 mezclas de escoria Blanca con adiciones parciales de Silicato de Sodio y RC, se usaron 3 mezclas de réplica, de forma independiente. Las proporciones con relaciones en peso de las mezclas se resumen en la Tabla 2. Las abreviaciones EB, CH, HS y SS se utilizaron para identificar a los materiales escoria blanca, escoria Negra, Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio, respectivamente por sus siglas. También fueron introducidos a la nomenclatura los porcentajes de reemplazo del material cementante principal: por ejemplo, EB8-HS2 representa la mezcla de 80% escoria blanca y 20% Hidróxido de Sodio;

EB8-CH1-SS1 representa la mezcla de 80% escoria Blanca, 10% RC y 10% Silicato de Sodio; EB8-HS0,5-SS15 representa la mezcla de 40% escoria Blanca, 5% Hidróxido de Sodio y 20% Silicato de Sodio.

Tabla 2. Composición y número de muestras ensayadas

Preparación de las muestras		
Identificación	Resistencia a los 7 días, Mpa	Resistencia a los 28 días, Mpa
EB80-SS15-HS5	2	2
EB75-CH15-SS15	2	2
EB75-CH10-SS15-HS5	2	2
EB70-CH15-SS15	2	2
EB70-CH10-SS15-HS5	2	2
EB65-CH20-SS15	2	2
EB65-CH15-SS15-HS5	2	2
EB60-CH25-SS15	2	2
EB60-CH20-SS15-HS5	2	2
EB55-CH30-SS15	2	2
EB55-CH25-SS15-HS5	2	2

Fuente: elaboración propia.

2.3. Ensayos y descripción de equipos

Las pastas geopoliméricas fueron caracterizadas mediante un difractómetro de rayos X (DRX). El arreglo experimental corresponde a Goniómetro PW3050/60 (00/400), manejado bajo un sistema XPERT-PRO usando una radiación monocromática de Co K α 1,54 Å, operado a 40 kV y 40 mA bajo condiciones de

temperatura de 25°C. Para evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos en la experimentación, se utilizaron parámetros estadísticos tales como la media aritmética (\bar{X}) y el coeficiente de variación (CV), los cuales determinan el promedio y la dispersión de los resultados medidos, respectivamente. Adicionalmente se utilizó el coeficiente de correlación (r) el cual permitió medir el grado de intensidad de relación entre los valores medidos y los calculados mediante los modelos propuestos en este estudio.



Figura 3. Preparación de las muestras. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y discusión

3.1. Difracción de rayos x

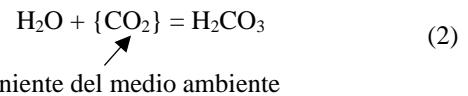
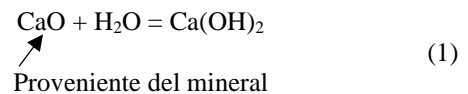
En el diagrama de DRX mostrados en la figura 2, se muestra la escoria blanca sin tratamiento. De acuerdo a esta figura el material amorfo de la escoria presente es de 62.5%, 2.5% de illita y 3.1% de calcita. De acuerdo a la teoría, el material amorfo debe reaccionar en el medio altamente alcalino, para la formación de microestructuras del tipo geopolimérico.

En el espectro de difracción de rayos X mostrado en la figura 4 se observa el material geopolimérico formado. Se observa la abundancia de fases cristalográficas en la mezclas ternarias hidratadas a causa de los altos porcentajes de escoria siderúrgica y RC presentes. Estas fases cristalinas son generadas por el enfriamiento rápido de los materiales en el proceso de obtención de acero en plantas metalúrgicas. En la acería, la escoria es enfriada rápidamente en piscinas con agua. La velocidad de enfriamiento depende del tamaño de la partícula: las partículas grandes enfrían más lentamente permitiendo la cristalización en su interior. Además, algunas de las partículas infladas explotan y forman pequeñas gotas

fundidas. Otras partículas son enfriadas de la misma forma que las partículas sólidas cuando abandonan definitivamente la llama y se mantienen como esferas huecas con variaciones en el espesor de las paredes. Además, una consecuencia de la presencia de gases (O_2 , CO_2 , SO_2 y H_2O) es su posible actuación en las reacciones secundarias con el vidrio que conllevan a la polimerización o despolimerización de las unidades de sílice de las partículas de ceniza [16].

De acuerdo a la figura 4 el carbonato de calcio ($CaCO_3$), se pasó del 3.1% al 3.9 lo que significa un aumento del 21%. La carbonatación en esta clase de estructuras es un fenómeno generalmente natural que produce la neutralización, en términos de pH, de la pasta de cemento. Adicionalmente se pueden generar aumentos de propiedades mecánicas y microfisuración en el concreto [17]. El mecanismo por el cual se produce la disminución de la alcalinidad se debe al contacto de los componentes alcalinos que se encuentran en la pasta con los componentes ácidos de la atmósfera, en este caso por el ingreso en la mezcla del dióxido de carbono (CO_2) proveniente del medio ambiente [18,19,20].

En el proceso los minerales que contienen calcio reaccionan con el CO_2 para formar carbonato de calcio. Las ecuaciones 1 y 2, muestran las etapas involucradas en la carbonatación clásica del $Ca(OH)_2$.



Fundamentalmente, en el concreto o mortero, el hidróxido de calcio expuesto a dióxido de carbono y agua sufre una reacción que produce carbonatos. Además de la portlandita, los aluminatos y sulfoaluminatos, también se transforman por la presencia del CO_2 . Al igual que los productos hidratados, las fases anhidras de los silicatos, aluminatos y ferro-aluminato cálcicos, pueden reaccionar con el CO_2 , previa hidratación y formar $CaCO_3$. Virtualmente, todos los elementos constitutivos son susceptibles de carbonatación.

Estas reacciones se producen durante la etapa de solidificación y cesa una vez la mezcla está completamente sólida, y es el causante del enriquecimiento de la calcita en nuestras muestras.

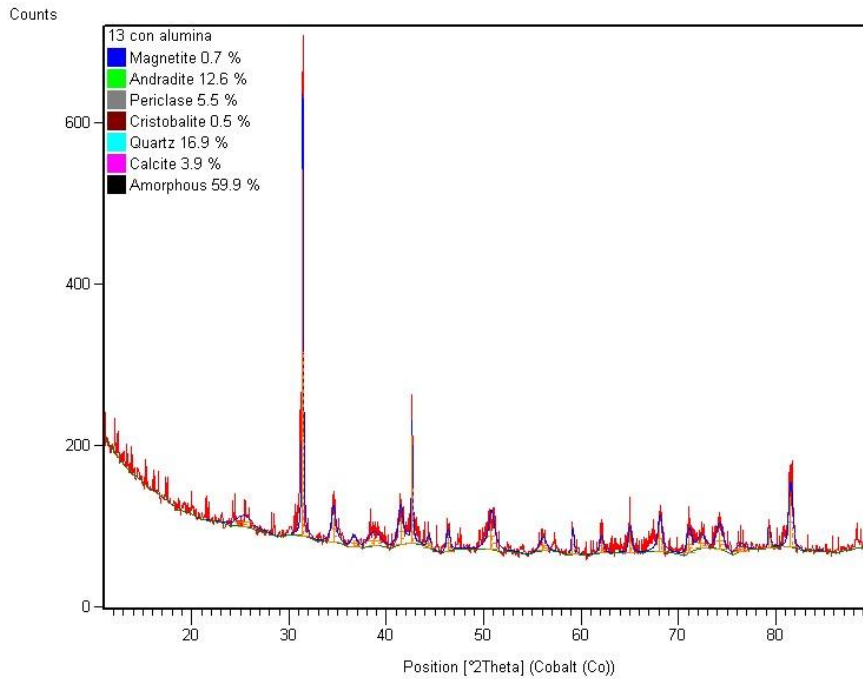
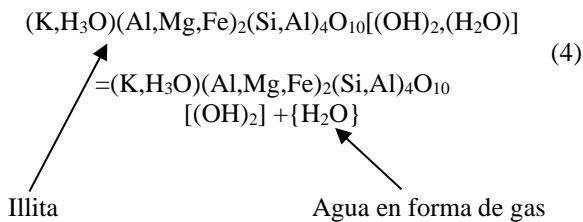


Figura 4. Difracción de Rayos X de la muestra EN70-CH10-SS15.

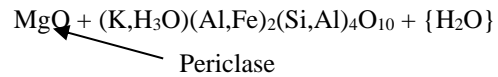
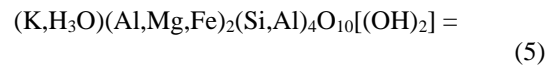
El CO₂ causante de esta transformación además de llegar al concreto a través de la atmósfera, puede hacerlo llegando en disolución transportado por agua. La concentración natural de dióxido de carbono en la atmósfera puede variar dependiendo de las condiciones del lugar. Desde 0.03% bajo condiciones naturales, 0.3 % en ciudades y hasta 3% en áreas industriales [21,22].

En el caso de la Illita (K,H₃O)(Al,Mg,Fe)₂(Si,Al)₄O₁₀[(OH)₂,(H₂O)] (ver figura3), estaba presente en solo un solo 2.5% de la escoria, y este compuesto en el análisis de DRX de la figura 4, no se encontró. A continuación, se muestran las posibles reacciones que pueden dar lugar para que se formen los compuestos mostrados en la figura 4.

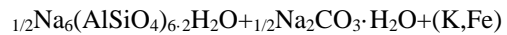
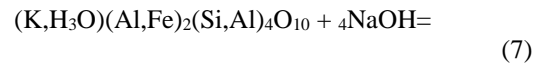


De acuerdo a estudios previos, se ha demostrado que la illita en medio altamente alcalinos el H₂O desaparece de la estructura cristalina, dada la cantidad de reacciones simultáneas propician la liberación de gases que se puedan producir.

Según la ecuación 4, la única forma de acuerdo al análisis de DRX de la figura 4, el magnesio presente en la illita se unió con un Oxígeno para formar el compuesto (Periclase) de la siguiente forma:

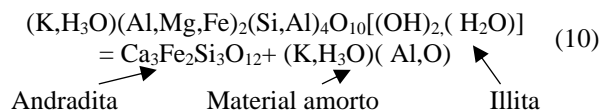
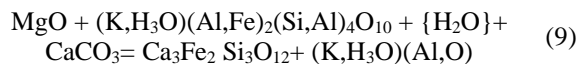
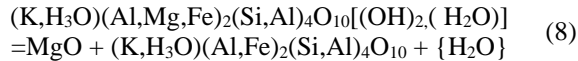


Por consiguiente:

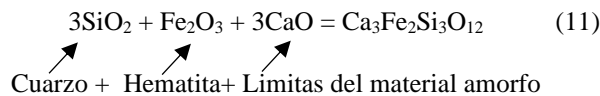


Estas ecuaciones pueden ser una aproximación a estudio desarrollado por Sedmale [23] del comportamiento y transformación de la Illita en los procesos de Geopolimerización, concluyendo que la transformación de la illita aporta resistencia a la compresión específicamente. Y que de acuerdo a sus resultados la presencia de illita en una escoria de horno eléctrico o de ceniza volante se puede considerar un producto para reaccionar con el hidróxido de sodio para la formación de estructuras del tipo Na₆(AlSiO₄)₆·4H₂O y Na₂CO₃·H₂O, que mejorar la resistencia mecánica de toda la estructura.

De acuerdo con los diagramas de DRX 4, durante el proceso alcalino llevado a cabo se formó Andradite ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$). Este compuesto ha sido reportado en pastas de tipo geopolimérico, y de acuerdo los procesos de carbonatación de estos compuestos en materiales cerámicos del tipo cementante, se podría inferir que algún carbonato reacciono con la illita, para la formación de andradita, explicado a en la ecuación 9:



La formación de andradita es importante en el proceso de geopolimerización, se busca su formación para obtener compuestos de mayor resistencia a partir de la andradita como la Wollastonita CaSiO_3 [24], dada la cantidad de reacciones que se dan simultáneamente en el proceso de formación podría también darse las siguiente reacciones para la formación de andradita desde el material amorfo (ver ecuación 11).



Las reacciones anteriores posiblemente determinaron el mecanismo de formación de la andradita, para esto el aspecto más importante es la disminución de la fase amorfa en más del 10% del total de la muestra (ver figura 2 y 4), del cual se puede concluir que las condiciones dadas fueron las correctas para la formación del material geopolimérico a partir de escoria blanca.

3.2. Microscopia electrónica de barrido

A continuación se muestran las imágenes logradas con un microscopio electrónico de barrido marca CarlZeiss Evo ma 10, previo alistamiento de la muestras en el sistema de recubrimiento de bombeo rotatorio compacto adecuado para SEM o Spaterim.

En la figura 5, no se observan micro porosidad importante a lo largo de la microestructura.

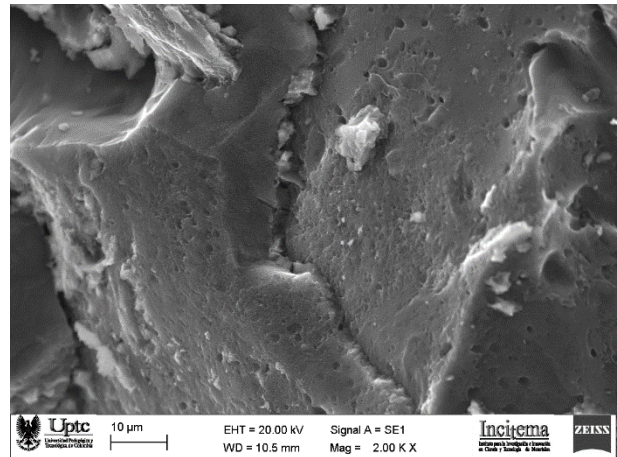


Figura 5. Microporosidad del geopolímero formado.
Fuente: elaboración propia.

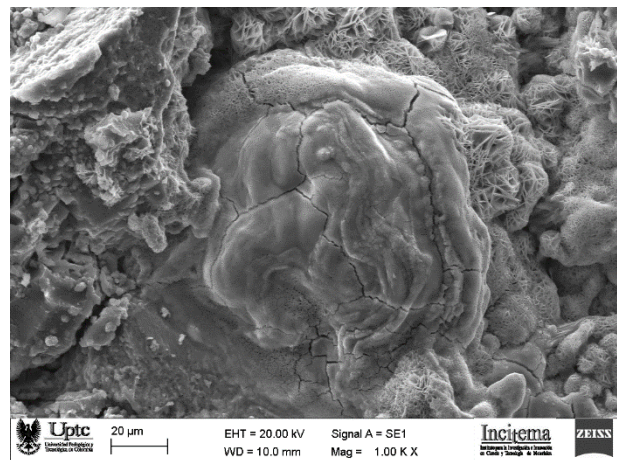


Figura 6. Muestra del geopolímero a 2.000 x.
Fuente: elaboración propia.

En la figura 6, se observa la presencia formas características de carbonatos rodeando un grano de magnetita residual del proceso de solidificación (ver figura 7).

La morfología encontrada en la muestra del geopolímero de la figura 8, es característica de los carbonatos de calcio presentes en las estructuras cristalinas del cemento portland. Esta se caracteriza por aguzas desordenadas, su formación se atribuye a la reacción del CO_2 de la atmosfera, reacciona con los silicatos y aluminatos de calcio de la fase amorfa, su composición química se muestra en el EDX de la figura 9.

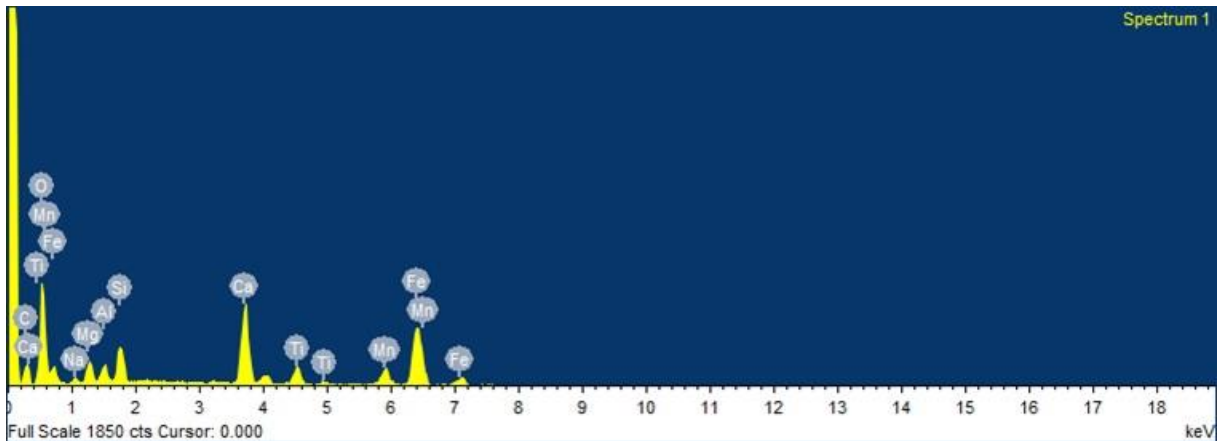


Figura 7. EDX de la figura 6. Fuente: elaboración propia.

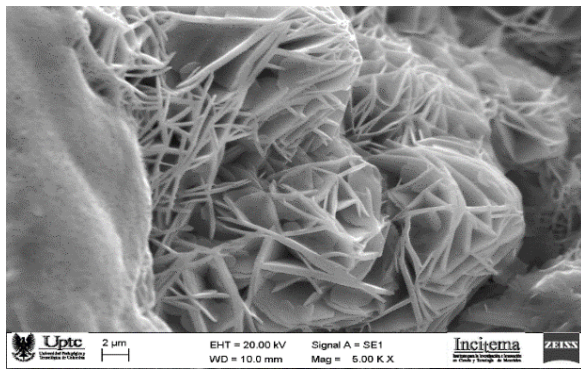


Figura 8. Muestra del geopolimero a 5.000 x. Fuente: elaboración propia.

En la figura 6, se observa la presencia formas características de carbonatos rodeando un grano de

magnetita residual del proceso de solidificación (ver figura 7).

La morfología encontrada en la muestra del geopolímero de la figura 8, es característica de los carbonatos de calcio presentes en las estructuras cristalinas del cemento portland. Esta se caracteriza por aguzas desordenadas, su formación se atribuye a la reacción del CO₂ de la atmosfera, reacciona con los silicatos y aluminatos de calcio de la fase amorfa, su composición química se muestra en el EDX de la figura 9.

3.3. Resistencia a la compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, f_c , para las mezclas ternarias a edades de 7 días y 28 días se muestran en la Tabla 3.

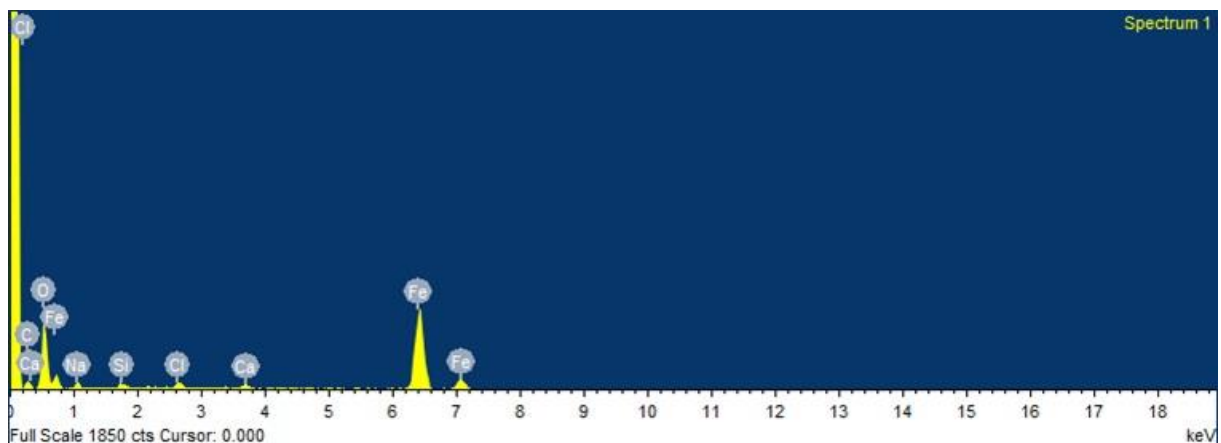


Figura 9. EDX de la figura 8. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resistencia a la compresión de las muestras falladas en la maquina universal

Resistencia a la Compresión de las muestras								
Identificación	Resistencia a los 7 días, Mpa				Resistencia a los 28 días, Mpa			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	X	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	X
EB80-SS20	7,07	7,63	7,13	7,28	8,56	6,78	7,89	7,74
EN80-SS20	6,56	7,12	6,88	6,85	8,09	7,4	7,67	7,72
EN75-CH20-SS0,5	10,16	10,72	10,48	10,45	14,73	14,59	14,84	14,72
EB75-CH10-SS20	9,72	8,92	8,68	9,11	16,29	16,79	17,04	16,78
EB60-CH20-SS15	13	13,56	13,66	13,41	17,57	17,43	18,02	17,68
EB60-CH20-SS20	6,99	6,19	6,49	6,56	11,56	10,06	10,85	10,83
EN70-CH10-SS15	9,87	9,07	9,57	9,50	14,44	12,94	13,93	13,77
EB70-CH10-SS15	14,32	13,52	12,72	13,52	18,89	18,39	18,08	18,49
EB65-CH10-SS20	8,35	8,75	8,85	8,65	12,92	12,62	13,21	12,92
EB40-EN40-SS20	7,56	8,32	8,62	8,17	10,55	9,78	8,62	9,65
EB40-EN40-SS15	15,78	15,35	15,85	15,66	16,34	16,45	16,34	16,35
EB70-CH10-SS20	9,87	9,77	9,21	9,62	14,44	13,64	13,57	13,89
EN60-CH20-SS15	13,9	14	13,97	13,96	16,47	15,87	14,33	15,23

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla 3, el aumento de escoria blanca hasta el 30% en la matriz aumenta la resistencia a la compresión, gracias a mayores contenido de SiO₂ y Al₂O₃ de la fase amorfa que pueden reaccionar, minerales que son responsables de la formación de las nuevas cadenas geo poliméricas. Su composición química es más parecida a la ceniza volante, material que inició la geopolimerización [25,26]. Debido a que los silicatos y aluminosilicatos ceden y ganan electrones con los hidróxidos OH⁻.

Los valores que se obtuvieron durante el trabajo se compararon con la norma ASTM C39 que reglamente el uso de ladrillos para mampuesto, superando los valores mínimos para este uso.

4. Conclusiones

Durante el presente trabajo se ha evaluado la posibilidad del uso de escoria blanca que es un material de desecho, como materia prima para la síntesis de geopolímeros con propiedades mecánica, y se han efectuado ensayos de laboratorio de lo cual podemos concluir lo siguiente:

El uso de escoria de blanca procedente del horno convertidor es adecuado para la formación de estructuras cristalinas propias de los geopolímeros en condiciones de alta alcalinidad, y cumple con la norma ASTM C39 de resistencia compresión para ladrillos de mampostería estructural de viviendas.

La formación andradita indica la formación correcta del geopolímero durante el trabajo, que las proporciones son adecuadas para la síntesis de este geopolímeros, y podría continuar el estudio de formación de mullita a partir de andradita o wollastonita y su influencia en la resistencia mecánica.

Se observó un aumento de la carbonatación del 21%, que influye positivamente en la resistencia a la compresión; además de mostrar que las condiciones propuestas de 5% de hidróxido de sodio y 15% de silicato de sodio son suficiente para propiciar un medio altamente alcalino para la formación de materiales geopoliméricos a partir de escoria blanca.

Referencias

- [1] K. Jeevanandan, V. Sreevidya, "Experimental investigation on concrete and geopolymer concrete", *Materials Today: Proceedings*, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.448
- [2] G. Gayathri, V. S. Ramya, T. Yasotha, M. Dheenedhayalan, "Experimental investigation on geopolymer concrete with E-waste", *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences and Engineering*, vol. 8, no. 2, 2016.
- [3] A. Hajimohammadi, T. Ngo, J. Vongsivut, "Interfacial chemistry of a fly ash geopolymer and aggregates", *Journal of Cleaner Production*, vol. 231, pp. 980-989, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.249

- [4] M. Ahdaya, A. Imqam, “Fly ash Class C based geopolymer for oil well cementing”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 179, pp. 750-757, 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2019.04.106
- [5] Y. Wang, J. Zhao, “Facile preparation of slag or fly ash geopolymer composite coatings with flame resistance”, *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 655-661, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.097
- [6] P. Sarker, S. Mcbeath, “Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements”, *Construction and Building Materials*, vol. 90, pp 91-98, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.054
- [7] M. Marcin, M. Sisol, I. Brezani, “Effect of Slag Addition on Mechanical Properties of Fly ash Based Geopolymers”, *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 191-197, 2016.
- [8] F. Skvara, “Alkali activated materials or geopolymers”, *Ceramics – Silikáty* (2007) pp 173–177.
- [9] M. Lahoti, K. Tan, E Yang, “A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications”, *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp 514-526, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076
- [10] P. Sarker, S. Mcbeath, “Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements”, *Construction and Building Materials*, vol. 90, pp 91-98, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.054
- [11] G. Kürklü, “The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 92, pp. 9-18, 2016.
- [12] A. Villaquirán-Cacedo, D. Rodríguez, R. Mejía, “Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. vol. 16, pp. 113-122, 2015.
- [13] M Ha , G. Le-Saout, F. Winnefeld, B. Lothenbach, “Influence of Activator Type on Hydration Kinetics, Hydrate Assemblage and Microstructural Development of Alkali Activated BlastFurnace Slags”, *Cem. Concr. Res.*, vol 43, no 3, pp. 301-310, 2011.
- [14] L. Xing, R. Feng, S. Shaoxian, A. Corona, N. Ortiz, E. Aguilar, “Effects of aggregates on the mechanical properties and microstructure of geothermal metakaolin-based geopolymers”, *Results in Physics*, vol 11, pp 267-273, 2018.
- [15] L. Xing, R. Feng, S. Shaoxian, M. Qinyong, “Deterioration in the microstructure of metakaolin-based geopolymers in marine environment”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol 8, no 3, pp 2747-2752, 2019.
- [16] T. Saeki, P. Monteiro, “A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixture”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 1914– 1921, 2005.
- [17] O. Gutiérrez, Y. Pineda, E. Vera, “Resistencia a la Carbonatación de Concretos elaborados con Ceniza Volante, Escoria de Alto Horno y Cemento Comercial”, *Revista Interciencia*, vol. 51, no. 4, 2015, doi: 10.3989/revmetalm.058
- [18] B. Dong , Q. Qiu, J. Xiang, C. Huang, H. Sun, F. Xing, Y. Liu. “Electrochemical impedance interpretation of the carbonation behavior for fly ash–slag– cement materials”, *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 933-942, 2015.
- [19] Asociación Española De Normalización Y Certificación. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación. UNE-EN 13295. Madrid: AENOR, vol. 18, 2015. Disponible en: http://www.anfapa.com/downloads/54_monografico-reparacion.pdf
- [20] Réunion Internationale Des Laboratoires Et Experts Des Matériaux, Systèmes De Construction Et Ouvrages - RILEM, CPC-18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth, Materials and Structures, vol. 21, no. 6, pp 453-455, 1988. Disponible en: https://www.rilem.net/gene/main.php?base=500221&id_publication=4&id_papier=3965
- [21] H. Cui, W. Tang, W. Liu, Z. Dong, Y. Xing, “Experimental study on effects of CO2 concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms”, *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 522-527, 2015.
- [22] American Concrete Institute, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Informe técnico ACI 222.R-01 (Reapproved 2010). Farmington Hills, MI: ACI, pp.41. 2011. Disponible en:

<https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=22201&Format=DOWNLOAD&Language=English>

[23] G. Sedmale, M. Randers, M. Rundans, V Seglins, “Application of differently treated illite and illite clay samples for the development of ceramics”, *Applied Clay Science*, vol. 146, pp. 397-403, 2017.

[24] P. Monich, A. Romero, D. Höllen, E. Bernardo, “Porous glass-ceramics from alkali activation and sinter-crystallization of mixtures of waste glass and residues from plasma processing of municipal solid waste”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 188, pp. 871-878, 2018.

[25] J. Davitovits, “Global warming impact on the cement and aggregates industries”, *Geopolymer Institute*, vol. 6, no. 2, pp. 263-278, 1994.

[26] J. Davitovits, M. Davitovits, “Geopolymer: room-temperature ceramic matrix for composites”, *Ceramics Engineering Science Process*, vol. 9, no. 7, pp. 835-842, 1998, doi: 10.1002/9780470310496.ch34