



Materiales Alternativos en la Industria de la Construcción Alternatives materials in the construction industry



*Campos Moreira, Sonia Vanessa*¹

¹ Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua

¹ sonia.campos@farq.uni.edu.ni / <https://orcid.org/0000-0002-4125-9313>

Recibido el 19 de octubre de 2022, aprobado el 02 de diciembre de 2022

RESUMEN | Los problemas ambientales asociados con la producción de cemento Portland han sido de gran relevancia debido a la generación de CO₂ emitido a la atmósfera. Por ende, han surgido algunas alternativas para tratar de obtener una producción más limpia del mismo sin afectar su calidad a través de la innovación tecnológica en las plantas cementeras. Este estudio se basa en el diseño y análisis de materiales cementantes alternativos ya sean de residuos o subproductos industriales. El primero es un subproducto de la elaboración del acero y el segundo es un producto de desecho de la industria del vidrio. Al mezclarse forman un aglutinante cementante inorgánico activado alcalinamente con sus siglas en inglés AAIB - alkaline activated inorganic binder- a partir de la escoria de horno de oxígeno básico BOFS - blast oxygen furnace slag- y polvo de vidrio llamado pantalla de cristal líquido transistor de película fina TFT-LCD - Thin film transistor-Liquid crystal display-. Con este hallazgo se logró obtener una mezcla cementante similar al cemento portland con un esfuerzo de compresión de $f_c' = 18.51$ MPa a los 14 días. Se considera como una propuesta viable en el sector construcción, con características similares al cemento, al mismo tiempo se ha logrado disminuir la emisión de CO₂ ya que se considera como remplazo total o parcial del cemento.

PALABRAS CLAVE | Activadores alcalino, escoria BOF, polvo de vidrio, TFT-LCD, w/b proporción.

ABSTRACT | The environmental problems associated with the production of Portland cement has concern the manufacturer industry due to the amount of CO₂ emitted into the atmosphere. Subsequently, some alternatives have emerged in order to get a cleaner production without altering its quality using technology innovation in cement plants. This research is based on the analysis and design of alternatives cementing materials using waste and industrial by-products. The first one is a subproduct made from the steel industry and the second one is a waste product form the glass industry. When both materials are mixed, they create what it is called Alkali-Activated Inorganic Binders (AAIB) from the, The Basic Oxygen Furnace Slag (BOF Slag), and the Thin Film Transistor Liquid Crystal Display (TFT-LCD), glass powder This purpose of this research was to obtain a binder similar to the Portland concrete with a minimum compression strength of $f_c' = 18.51$ MPa in 14 days. It is considered an available option I the construction industry due to it similar characteristics to the OPC; Furthermore, it has been accomplished a significant CO₂ reduction as a result of partial or total replacement of cement.

KEYWORD | Alkaline activators, BOF Slag, glass powder fineness, TFT-LCD, w/b ratios.

© Copyright 2022. Universidad Nacional de Ingeniería

1. Introducción

El cemento Portland ordinario (CPO) se considera el material de construcción por excelencia porque no hay aglomerante que tenga la aceptación que tiene este material. Esto se debe a su alto rendimiento, su buena relación calidad / precio y porque es posible encontrar las materias primas para producirlo en casi cualquier parte del mundo. Sin embargo, la producción de cemento Portland es un proceso complejo y muy intensivo en lo que a energía se refiere, desde el uso de materias primas hasta la producción y molienda de clínker. El CPO es una de las industrias que emite mayores cantidades de CO₂ a la atmósfera ya que en el proceso de fabricación, se emiten alrededor de 900 kg de CO₂ por tonelada de cemento producida, lo que representa aproximadamente un 5-7% de las emisiones globales provocadas por el ser humano (Chen et al., 2010). Las principales emisiones de CO₂ en la industria del cemento provienen directamente de la combustión de combustibles fósiles y la calcinación de piedra caliza de óxido de calcio. Una cantidad indirecta de CO₂ proviene del consumo de electricidad generada por la quema de combustibles fósiles y los procesos de molienda. Aproximadamente alrededor del 33% de las emisiones de CO₂ se originan en el combustible y el resto se origina en la calcinación de piedra caliza (66%) (Anand, et al., 2006). Se presenta el proceso típico de producción de cemento Portland y las emisiones CO₂ y otros gases (ver figura 1).

Figura 1 *Proceso típico de producción de cemento portland.*



Nota. *Fases en la producción de cemento.* Tecnología del concreto.
<http://tecnologia-concreto.blogspot.com/2016/05/semana-1-introduccion.html>



El Polvo de Vidrio de Pantalla de Cristal Líquido de Transistores de Película Fina (TFT-LCD), es un producto de desecho de la industria de producción de vidrio. El vidrio es un material inerte único que se puede reciclar muchas veces sin cambiar sus propiedades químicas. Los principales componentes químicos del vidrio TFT-LCD de desecho son SiO_2 , Na_2O y una pequeña cantidad de película conductora de óxido de indium-estaño. Por lo tanto, el tratamiento directo en vertederos, incineración o compostaje no es apropiado para tratar residuos de polvo de vidrio TFT-LCD (Kae-LongLin, 2007).

El polvo de vidrio es un material semejante al Portland en la naturaleza sus propiedades físicas son muy parecidas al hormigón, por lo que añadir el vidrio residual triturado en el hormigón como agregado fino puede reducir el contenido de aire, el peso unitario (Topcu & Canbaz, 2004), el costo del material y así como también el impacto en el medio ambiente en la reducción de CO_2 con el cual se ha convertido en una práctica necesaria para la protección medioambiental sostenible. (Puerta et al., 2012)

La creación de materiales cementantes inorgánicos activados alcalinamente (AAIB) provienen de compuestos de aluminosilicatos, soluciones alcalinas y soluciones de silicato alcalino. Los activadores alcalinos más utilizados son una mezcla de hidróxido de sodio o potasio (NaOH , KOH) con vidrio soluble de sodio ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) o vidrio soluble de potasio ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$) (Barbosa et al., 2000), (Escalante-Garcia, 2001).

En términos generales, se hizo el análisis de materiales AAIB ya que son más sostenibles con el medio ambiente que los materiales cementantes de cemento Portland, ya que se fabrican a temperatura ambiente, producen entre un 20 y un 50% menos de emisiones de CO_2 y requieren menos consumo de energía. Las características de los AAIB son que muestran un alto rendimiento mecánico y también una resistencia superior a los ácidos y la abrasión que los hormigones CPO.

Otros estudios pueden producir resultados diferentes, que dependerán en gran medida del tipo de activador. Se recomienda intentar sustituir, en la medida de lo posible, el activador comercial (waterglass) empleado hasta el momento (Torres-Carrasco et al, 2014), por uno más ecológico y con excelentes propiedades mecánicas.

2. Método

La investigación se basa en dos materiales que son desechos de fábricas industriales en el cual se reusaran para producir AAIB. La primera, es la Escoria Básica de Horno de Oxígeno (Escoria BOF) CaO , que se mezcla con agua (H_2O) para producir Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como una solución alcalina llamada “Activador” (ver figura 2). El segundo, es la pantalla de cristal líquido transistor de película delgada (TFT-LCD) SiO_2 , polvo de vidrio (ver figura 3). El activador o la solución alcalina activará el polvo de vidrio convirtiéndolo en un aglomerante. La composición química de la escoria BOF y el polvo de vidrio utilizadas en este estudio proceden de CHC Resources Corporation (CHC) (McArthur & Spalding, 2004), una planta de fabricación establecida en Taiwán.



Figura 2 Escoria Básica de Horno de Oxígeno (BOF)



Nota. Foto del autor, 2017.

Figura 3 Polvo de Vidrio (TFT-LCD)



Nota. Foto del autor, 2017.

3. Desarrollo

Para la elaboración del aglutinante cementante inorgánico activado alcalinamente (AAIB), se tomó en consideración diferentes métodos con el fin de obtener la mejor consistencia con las propiedades mecánicas aceptables en el ámbito constructivo. La Finura del Polvo de Vidrio juega un papel importante en el desarrollo adecuado del AAIB, así como el contenido Equivalente Alcalino (AE%) y las proporciones agua aglutinante (w/b), las temperaturas y tiempo de curado, así como también el tiempo de envejecimiento de los especímenes.

La investigación se puede dividir en tres pasos:

- A. Finura del polvo de vidrio 1,652.60 cm²/g and w/b= Activador / Polvo de vidrio
- B. Finura del polvo de vidrio 1,652.60 cm²/g, AE% and w/b = Activador / Polvo de vidrio + Escoria BOF.
- C. Finura del polvo de vidrio 4,500 cm²/g and w/b= Activador / Polvo de vidrio (TFT-LCD)

La finura del polvo de vidrio se evaluó por medio del ASTM¹ C204 – 16 : Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. Mediante la ecuación 1 dando como resultado en un tiempo de 48 horas una finura de 4,500 cm²/g, se:

$$S = \frac{S_s \rho_s (1 - \varepsilon_s) \sqrt{\varepsilon_s^3} \sqrt{T}}{\rho (1 - \varepsilon) \sqrt{\varepsilon_s^3} \sqrt{T_s}} \quad (1)$$

El contenido Equivalente Alcalino (AE%) se basa en el porcentaje de escoria BOF a polvo de vidrio CaO / SiO₂. La Ecuación 2, muestra la relación de ambos:

$$AE\% \frac{CaO}{SiO_2} \text{ (weight ratio)} \quad (2)$$

¹ American Society for Testing and Materials



Agua/Aglutinante (w/b) Ratio durante el tiempo de mezcla, se seleccionó la relación w/b más apropiado de acuerdo con la viscosidad del aglutinante y la finura del vidrio. Se utilizó la ecuación 3 Finura 4,500 cm²/g y 4 Finura 1,652 cm²/g. para los Casos antes mencionados donde la finura del vidrio es de 1,652.60 cm²/g y 4,500 cm²/g

- Caso (A) y (C)

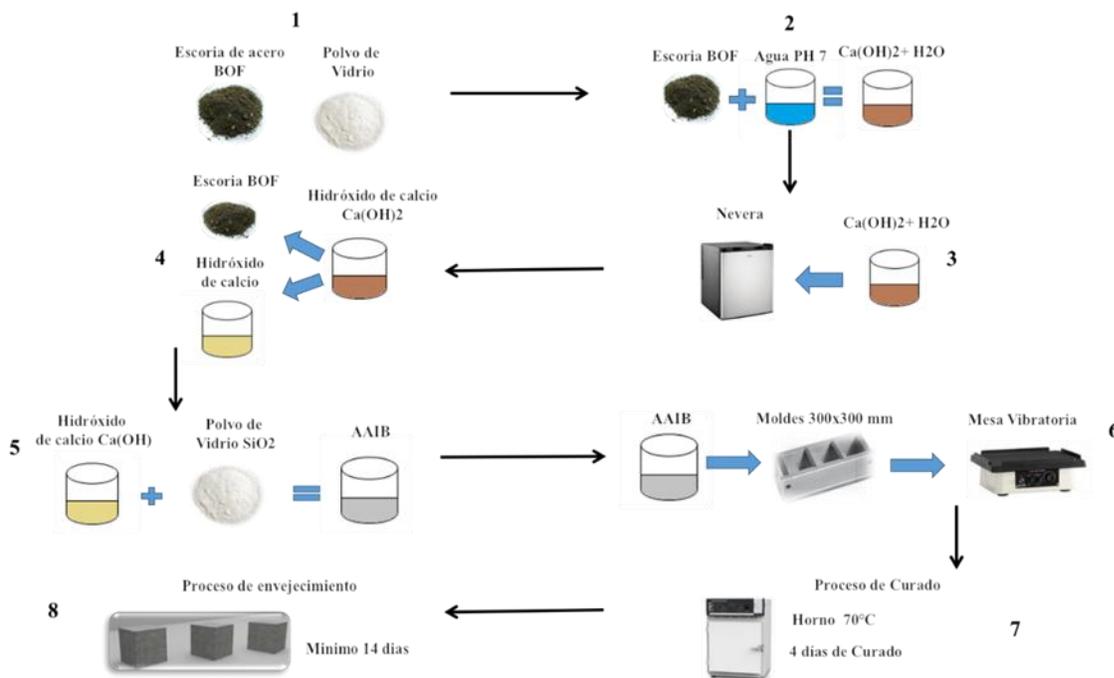
$$\frac{w}{b} = \frac{H_2O}{SiO_2} \quad (3)$$

- Caso (B)

$$\frac{w}{b} = \frac{H_2O}{BOF Slag + SiO_2} \quad (4)$$

Se elaboraron 207 moldes para las diferentes finuras de polvo de vidrio, la primera fue de 1,652.60 cm²/g y w/b = activador/polvo de vidrio con 27 moldes. La segunda sesión de pruebas se consideró la Finura de Polvo de Vidrio 1,652.60 cm²/g, AE%, y w/b = CaO/Polvo de Vidrio + Escoria BOF con 99 moldes y los 21 moldes restantes con una finura de 1,652.60 cm²/g se hicieron bajo una temperatura de curado de 80 °C y w/b = activador/polvo de vidrio. A continuación, se denota el procedimiento por el cual se llevaron a cabo las 207 pruebas (ver figura 4).

Figura 4 Proceso de elaboración del AAIB.



Nota. Elaboración Propia, 2017.



Materiales

1. Se selecciona el material de estudio: Escoria de acero BOF y polvo de vidrio.

Escoria de acero BOF

2. Se mide la escoria de acero BOF (CaO) y se le agrega Agua con un ph 7. Se mezcla rigurosamente en un contenedor de acero inoxidable.
3. Se refrigera por un periodo de 4 horas hasta que la solución alcance un PH mayor de 13.
4. Una vez que se alcanza, se separa el sólido (BOF) de la solución la cual es una combinación de hidróxido de calcio llamada “Activador” $Ca(OH)_2$.

Polvo de vidrio

5. El polvo de vidrio con una finura $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$ se mezcla con el hidróxido de calcio a la cual se le llama aglutinante cementante inorgánico activado alcalinamente AAIB. Luego en un recipiente de acero inoxidable se colocó en la máquina mezcladora de mortero DC-STIRRER 110.
6. Se vierte el AAIB en moldes de acero de $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}$. Los moldes de acero se colocaron en la mesa de vibración (CONTROLES a una frecuencia de 60 Hz) para eliminar cualquier burbuja de aire en cada muestra cúbica. Las muestras se cubrieron con una lámina de plástico para evitar la evaporación de la humedad.

Proceso de Curado

7. Las muestras se colocaron en un horno a diferentes temperaturas de curado ($60 \text{ }^\circ\text{C}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$) por un tiempo de (1, 2 y 4 días).

Proceso de envejecimiento (edad en días)

8. Las muestras se sacan del horno, luego se desmoldan y se colocan al aire a temperatura ambiente (ver figura 5). La edad en días es el tiempo que el molde ha estado fuera del horno antes de realizar la prueba de resistencia a la compresión, las cuales fueron:
 - 0 días: La muestra cúbica debe enfriar la temperatura del horno durante 1 hora y luego realizar la Resistencia a la compresión.
 - 7 días
 - 14 días

Resistencia a la Compresión

9. Utilizando una máquina de ensayo universal (Shimadzu UHC-100A) a una tasa de esfuerzo de compresión constante de 300 kPa/s , se realizan todos los moldes cúbicos.

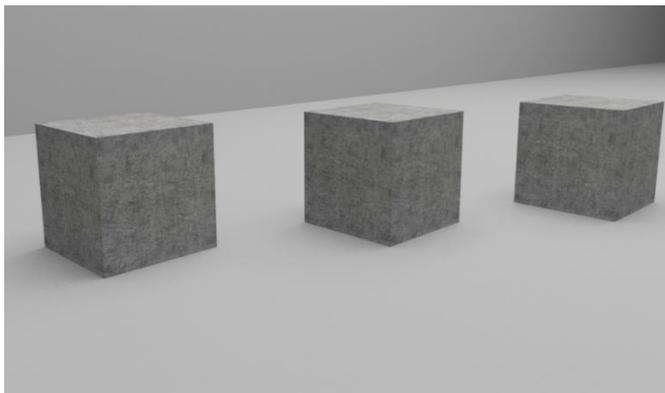


4. Resultados

Los resultados obtenidos durante la elaboración total de 207 moldes de AAIB tomando en consideración los siguientes factores:

- Finura de polvo de vidrio
- Porcentaje de Alcalinidad AE%
- Relación en w/b lo que es entre “Activador” y el polvo de vidrio.
- Temperatura adecuada de horno
- Tiempo adecuado de horno
- Tiempo de curado fuera del horno.

Figura 5 Moldes de AAIB para la prueba de compresión



Nota. Elaboración Propia, 2017.

Se procede a evaluar su consistencia y resistencia a compresión de cada uno de los moldes, con el fin de obtener resultados similares al COP. En la Tabla 1 presenta los mejores resultados a compresión, el cual se obtuvo con una temperatura de 70 °C y relación w/b tomada de la Ecuación 3 y finura de vidrio de 4,500 cm²/g.

Tabla 1: *Esfuerzos de compresión*

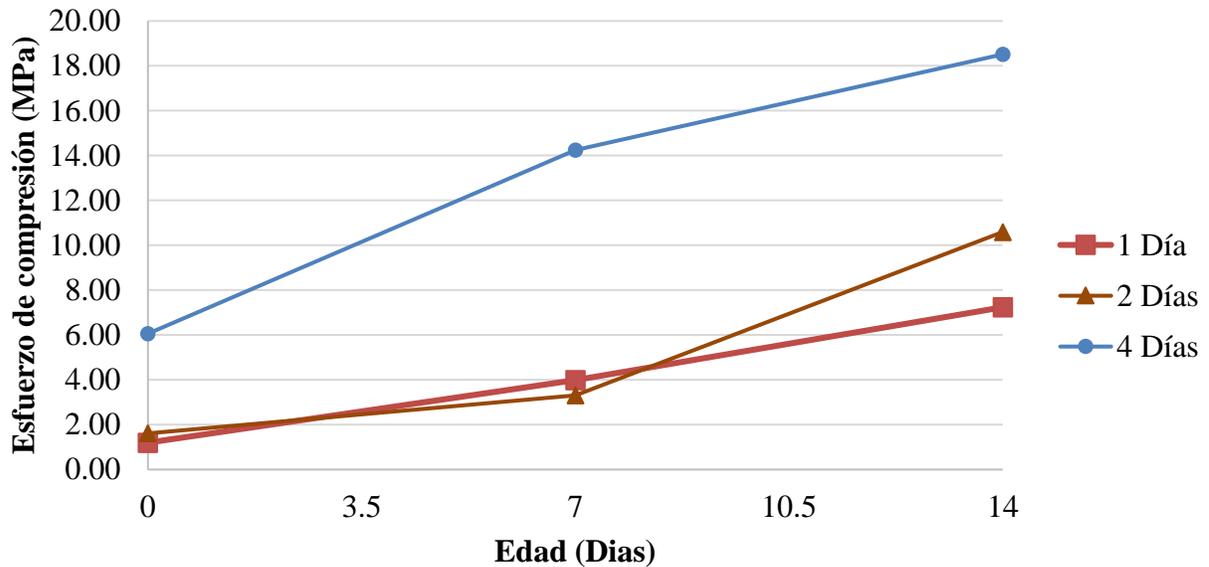
Espécimen No	Edad en Días	Esfuerzo de Compresión (MPa)
0.3-4-14	14	18.51
0.35-4-14	14	12.40
0.4-4-14	14	8.79
0.3-2-14	14	10.59
0.35-2-14	14	5.85
0.4-2-14	14	3.27
0.3-1-14	14	7.24
0.35-1-14	14	4.59
0.4-1-14	14	4.00

Es importante mencionar, que los hallazgos de este estudio son consistentes con Deventer., H. Xu y J. Van. (Xu & Deventer, 2000) quienes encontraron que, cuanto más pequeñas son las partículas de polvo, mayor es la reacción y más rápida es la velocidad de polimerización con esto logro alcanzar una resistencia a la compresión de 18.51 MPa equivalente a 2,684.64 Psi. Con una muestra de polvo de vidrio de 1,652.60 cm²/g generó resultando de esfuerzo a la compresión de 3.43 MPa. Mientras que, en el caso de 4,500 cm²/g, alcanzó un esfuerzo de 18,51 MPa (ver figura 6).



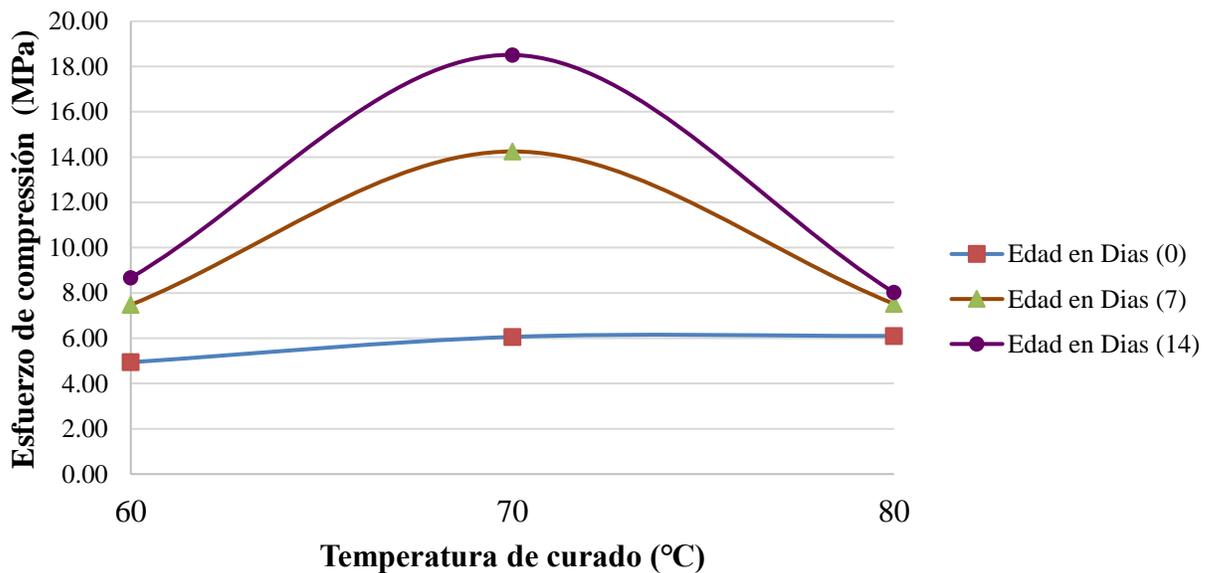
Tomando en cuenta la temperatura, el mejor resultado fue alcanzado a una temperatura de 70°C y con un w/b= 030. A los 60 no alcanzó un significativo esfuerzo a la compresión, mientras que a los 80° presento un declive en el que material y pierde sus propiedades. La temperatura optima por ende es de 70°C, comparación de los resultados con las diferentes temperaturas (ver figura 7).

Figura 6 Esfuerzo de compresión vs edad en días del AAIB



Nota. Elaboración Propia, 2017.

Figura 7 Esfuerzo de compresión vs temperatura con diferentes tiempos de curado a los 4 días



Nota. Elaboración Propia, 2017.



Tomando en consideración los factores indicados previamente se logró obtener un AAIB con propiedades relativamente similares a la del cemento.

1. La finura de polvo de vidrio en este estudio de $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$, la cual mejora sustancialmente en un 100% la resistencia a la compresión del AAIB, lo que sugiere que la finura de $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$ se puede utilizar como un reemplazo parcial o total de la mezcla del concreto.
2. El AE%, que muestra un incremento en la resistencia a la compresión relacionada con AAIB donde la escoria BOF sólida se agregó al polvo de vidrio ($1,652.60 \text{ cm}^2/\text{g}$), la resistencia a la compresión máxima y mínima son 4.17 MPa y la resistencia nula a temperatura de curado de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.
3. Las relaciones w/b, son de vital importancia pues el uso correcto de las ecuaciones 3 y 4 determinaran la relación más apropiada para la mezcla, esta relación entre el Activador y el polvo de vidrio ($4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$), el resultado es una resistencia a la compresión de 18.51 MPa, bajo una temperatura de curado de $70 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. La temperatura de curado, presentó diferentes comportamientos. Los mejores resultados se obtuvieron a una temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Se puede notar que con 60°C y 80°C las resistencias decrecen.
5. El tiempo de curado dentro del horno se estableció en 1,2 y 4 días, para las diferentes relaciones de w/b. El incremento en la duración del curado es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión, se puede deducir que a una temperatura más alta de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ produce un material frágil que se rompe fácilmente en su 4to día de curado. Por otro lado, el espécimen bajo una temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$ muestra una mejor respuesta con el incremento en la duración de curado liderando los mejores resultados en sus 4to días.
6. La Tiempo de Envejecimiento propuesto fue de 0, 7 y 14 días, las probetas incrementan la resistencia a la compresión de la misma manera que se colocan a temperatura ambiente, la mejor resistencia a la compresión resulto 18.51 MPa en 14 días.

5. Conclusiones

El comportamiento de los materiales alternativos en la industria de la construcción para el cual se tomó la Escoria de Horno de Oxígeno Básico (BOF Slag) como activador y la Pantalla de Cristal Líquido de Transistor de Película Delgada (TFT-LCD), polvo de vidrio. Con esta investigación se ha buscado la creación de un nuevo producto cementante que cumpla con los requisitos físicos y mecánicos del COP. En orden de contribuir con una economía circular en la que se haga una reducción de los desechos de industrias, reúso de los materiales sobrantes como es el reciclaje del vidrio y la escoria del acero. Los productos derivados de AAIB son más sustentables con el medio ambiente produciendo entre un 20-50% menos CO_2 que el COP.

En el sector construcción el uso de materiales derivados del AAIB debe ser considerado con su debida precaución en términos de su ubicación y aplicación constructiva. Los materiales AAIB poseen alta resistencia a bajas temperaturas y la abrasión que deben ser evaluados según las características constructivas de interés del proyecto. Se puede concluir que los materiales AAIB



son más amigables con el medio ambiente reduciendo la huella de carbono con un proceso de elaboración a bajas temperaturas, resultando con características similares a la del CPO.

6. Recomendaciones

Durante el estudio se denoto algunas limitaciones que deberán ser consideradas en orden de futuras mejores en la utilización de materiales AAIB. Los resultados deberán ser interpretados con precaución en orden de poder evaluar.

- La resistencia a la compresión solo se midió durante un período de envejecimiento de 0, 7 y 14 días.
- Las relaciones a/b se midieron con la relación, finura de polvo de activador a vidrio de 1,652.60 cm²/g y 4,500 cm²/g y finura de polvo de activador a vidrio de 1,652.60 cm²/g + escoria sólida BOF residual. Sería interesante evaluar la relación a / b del Activador con la finura del polvo de vidrio de 4,500 cm²/g + escoria BOF residual sólida para evaluar la capacidad de resistencia a la compresión.
- Los especímenes se probaron solo por la resistencia a la compresión del concreto, por lo que se necesitará mucho más trabajo para investigar el comportamiento de la resistencia a la flexión del AAIB. Será necesario realizar más estudios que tengan en cuenta estas variables.
- La evidencia indica que el AAIB elaborado con residuos sólidos puede alcanzar la resistencia mínima del hormigón en sus 14 días de tiempo de envejecimiento. Debido a la composición química de la escoria BOF, se recomienda realizar investigaciones para la tasa de expansión en condiciones de humedad, así como la finura de Blaine sugerida por Andersson y Gram (1988).

7. Referencias

- Anand, S., Vrat, P., & Dahiya., R. (2006). *Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO2: Emissions from the Cement industry, J. Environ. (Vol. 79). Manage.*
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien., A. (2010). *Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation, J. Clean.*
- Escalante-Garcia. (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends. *Cement and Concrete Research, 10(31), 1403 - 1409.*



- Kae-LongLin. (2007). The effect of heating temperature of thin film transistor-liquid crystal The effect of heating temperature of thin film transistor-liquid crystal. *Journal of Cleaner Production*, (págs. 1755-1759).
- McArthur, H., & Spalding, D. (2004). *Engineering Materials Science, Properties, Uses, Degradation and Remediation*. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited.
- Puertas, F., Torres-Carrasco, M., Varga, C., Torres, J., Moreno, E., & J.G.Palomo. (2012). Re-use of urban and industrial glass waste to prepare alkaline cements. 52. Portugal: 4th International Conference on Engineering for waste and biomass valorization, Oporto.
- Topcu, I. B., & Canbaz, M. (February, 2004). M. Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research. *Cement and Concrete Research*, 34, págs. 267-274.
- Torres-Carrasco, M., Palomo, J., & Puertas., F. ((2014)). *Sodium Silicate solutions from dissolution of glass wastes: statistical analysis* (Vol. 64). Mater. Construcc.
- Xu, H., & Deventer, J. V. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. 59(3), 247-266.

