



CEMENTO SUPERSULFATADO A PARTIR DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA, CAL Y SULFATO DE CALCIO PARA APLICACIONES NO ESTRUCTURALES

SUPERSULPHATED CEMENT FROM CANE BAGASSE ASH, LIME AND CALCIUM SULFATE FOR NON STRUCTURAL APPLICATIONS

Léster Javier Espinoza Pérez¹
Kenneth Missael Carmona Guido²
Jerry Moisés Lacayo Álvarez³

(Recibido/received: 22-02-2024; aceptado/accepted: 16-abril-2024)

RESUMEN: El cemento Portland es el ligante más utilizado a nivel mundial, sin embargo, su producción implica la emisión de 1 kg de CO₂ por cada 1 kg de cemento producido, por lo que hace necesario el desarrollo de cementos sustentables, con buenas prestaciones mecánicas, pero amigables con el ambiente. Se elaboró un cemento supersulfatado a base ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) activado con óxido de calcio (CaO) y sulfato de calcio (CaSO₄), obteniendo un valor máximo de resistencia mecánica a la compresión (RMC) de 10.75 MPa, para la mezcla con una composición de 80% CBCA, 10% CaO y 10% SC. El arreglo experimental Taguchi fue un L₁₈ (6¹ x 3²). Se realizaron 18 ensayos por triplicado, variando las relaciones másicas de los tres reactivos principales. Se utilizó una temperatura inicial de curado (TIC) con tres niveles: temperatura ambiente (~35 °C), 50 °C y 100 °C y una relación agua/ligante con niveles de 0.25, 0.30 y 0.35. Se realizó una caracterización química mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), para conocer los posibles productos de reacción, pudiendo identificar productos tal como cal, etringita, gel de sílice y potencialmente CSH. Finalmente se determinó el efecto del activador alcalino, realizando ensayos de control sin CaO y sin SC, obteniendo un valor de RMC de 7.72 MPa para el control sin SC y 1.38 MPa para el control sin CaO, destacando la importancia del CaO en la formación de gel CSH.

PALABRAS CLAVE: ligante; yeso; resistencia a la compresión; espectroscopia; ceniza.

ABSTRACT: Portland cement is the most used binder worldwide, however, its production involves the emission of 1 kg of CO₂ for every 1 kg of cement produced. The development of sustainable cements is necessary, with good mechanical performance, but friendly to the environment. A supersulfated cement based on sugarcane bagasse ash (SCBA) activated with calcium oxide

¹ Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua, Docente, lester.espinoza@daca.uni.edu.ni, <https://orcid.org/0000-0001-5621-9624>

² Matadero San Martín, Nicaragua., Graduado de Ingeniería Química UNI, kmcg1380@gmail.com

³ Laboratorios CEGUEL, Nicaragua, Graduado de Ingeniería Química, rashghoul20@gmail.com

(CaO) and calcium sulfate (CaSO_4) was elaborated, obtaining a maximum value of mechanical strength (MS) of 10.75 MPa, for the mixture with a composition of 80% SCBA, 10% CaO and 10% CS. The experimental Taguchi setup was an L_{18} ($6^1 \times 3^2$). 18 tests were carried out in triplicate, varying the mass ratios of the three main reagents. An ICT was used with three levels: room temperature (~ 35 °C), 50 °C and 100 °C and a water/binder ratio with levels of 0.25, 0.30 and 0.35. A chemical characterization was carried out using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), to know the possible reaction products, being able to identify products such as lime, ettringite, silica gel and potentially CSH. Finally, the effect of the alkaline activator was determined, carrying out control tests without CaO and without CS, obtaining an MS of 7.72 MPa to the control without CS and 1.38 MPa for the control without CaO, highlighting the importance of CaO in the formation of CSH-gel.

KEYWORDS: binder, gypsum, compressive strength, spectroscopy, ash.

INTRODUCCIÓN

En Nicaragua operan cuatro ingenios azucareros: San Antonio, Monte Rosa, Montelimar y Compañía Azucarera del Sur S. A. (CASUR). La zafra azucarera 2021-2022 cerró con una producción de 7,351,391 toneladas. La cosecha generó 220 millones de dólares solo en azúcar exportada, más los derivados como melaza y alcoholes que sumaron unos 260 millones de dólares en exportaciones totales, de acuerdo con el Comité Nacional de Productores de Azúcar (Ingenio Monte Rosa, 2021). A su vez, los cuatro ingenios han realizado importantes inversiones en tecnología e infraestructura, lo que ha permitido que, además de procesar caña para la producción de azúcar, alcohol y mieles, generen energía eléctrica a partir de la quema de bagazo. Parte de esta energía es utilizada para autoconsumo en el proceso de producción de azúcar, y los excedentes de energía lo entregan a la red pública.

La energía renovable suministrada por los ingenios es equivalente al 20 % de lo que se consume en Nicaragua y genera un impacto positivo hacia el ambiente, disminuyendo las emisiones de CO_2 a la atmósfera y mitigando los efectos del calentamiento global. Aunque estas agroindustrias aportan valor a la economía nicaragüense, pocas veces disponen de un sistema de tratamiento de los residuos que generan. Por ejemplo, tan solo en la zafra azucarera 2021-2022, el Ingenio Monte Rosa generó 81,000 toneladas de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), de la cual muy poca se utilizó como fertilizante para la agricultura y el resto se acumuló en espacios vacíos, ocupando áreas y contaminando el ambiente.

A nivel internacional han surgido propuestas tales como la elaboración de adsorbentes de bajo costo para metales pesados (cobre, cadmio, plomo) a partir de CBCA, sin embargo, los volúmenes de CBCA consumidos no son significativos. En la presente investigación se desarrolló un cemento supersulfatado (CSS) base CBCA (fuente de Si^{4+} , Al^{3+}) mediante la ruta química de activación con iones OH^- (provenientes de la hidratación de la cal) y sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En esencia, el estudio consistió en encontrar la formulación óptima a partir de las materias primas mencionadas mediante un diseño de Taguchi, evaluando la resistencia a la

compresión (RC), productos de reacción y el efecto de los activadores en las mezclas reactantes ternarias.

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON) 12 008 – 09: Fabricación de bloques de concreto establece los valores mínimos de resistencia a la compresión (RC) de los bloques de concreto y los clasifica en bloque estructural tipo 1 (BE-1), bloque estructural tipo 2 (BE-2) y bloque no estructural (BNE), dependiendo del valor de RC medido. EL BE-1 debe tener una RC promedio de 13.65 MPa, el BE-2 debe tener una RC promedio de 8.41 MPa, y finalmente, el BNE debe tener una RC promedio de 5.65 MPa. La pasta con mayor RC obtenida fue de 10.75 MPa a 28 días de curado, la cual superó (sin el uso de arena) la RC promedio que debe tener un BE-2. Sin embargo, más investigación es necesaria para poder ofrecer una alternativa estructural, sobre todo considerando que el cemento Portland normalmente tiene una resistencia mecánica a la compresión de alrededor de 40 a 70 MPa, dependiendo de la mezcla y condiciones de curado.

METODOLOGÍA

La presente es una investigación experimental, puesto que busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo (Lozada, J., 2014). La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) fue recolectada húmeda (49% de humedad) en las instalaciones del Ingenio Monte Rosa, en donde se recolectó cantidad suficiente para los ensayos. Este material se sometió a secado en un horno de convección de la marca Fisher Scientific en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), usando recipientes metálicos llenados hasta 4/5 de su capacidad. La temperatura de secado fue de 110 °C durante 24 horas.

El óxido de calcio (CaO) o cal viva fue adquirido en Nicaragua a través del grupo de empresas “Inversiones mineras, S.A (IMISA)”. Se usó CaO ya que ha demostrado ser más efectiva para el caso de cementos supersulfatados (Cabrera-Luna et al., 2021). La cal viva (CaO) adquirida no fue tamizada debido a presentarse en estado físico muy fino, ya que toda pasaba por el tamiz 140. El $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tuvo un papel como activador sulfático (Cabrera-Luna et al., 2021). Este material fue adquirido en una ferretería local en Managua. No se realizó un tamizado para aprovechar toda la materia prima y, además, se encontraba como un polvo muy fino.

Se utilizó agua potable procedente del laboratorio de materiales y suelos del Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios (RUPAP) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), no se realizó ningún tratamiento por considerar las implicaciones económicas que tendría a gran escala.

Finalmente, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango superplastificante y acelerante de resistencia de la marca Sikament® -100 MX. Se trabajó con una dosificación del 1% (aproximadamente 11 ml/kg de cemento).

Dado que la investigación tuvo como propósito obtener un cemento supersulfatado (CSS) a partir de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA), mediante la ruta química de la activación con cal viva (CaO) y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para el estudio de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

De ahí que las variables de estudio se fijaron como sigue:

- % CaO: Porcentaje en masa de cal viva en la mezcla cementante, en los rangos de 10, 15 y 20%. Estos porcentajes fueron tomados de la literatura, (Cabrera-Luna et al., 2021).
- % SC: Porcentaje en masa de Sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la mezcla cementante, con valores de 5 y 10%. Estos porcentajes fueron tomados de la literatura, (Cabrera-Luna et al., 2021).
- % CBCA: Existe una restricción para las combinaciones posibles de las 3 variables % CBCA, % CaO y % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y es que debe sumar exactamente 100 %, ya que se podrían obtener combinaciones incorrectas (mayores a 100%). Sin embargo, matemáticamente existen 6 combinaciones posibles de CBCA-CaO-SC cuyos resultados den 100% de composición, estas combinaciones son: 85-10-5, 80-15-5, 75-20-5, 80-10-10, 75-15-10 y 70-20-10. Por lo anterior, se fijó el porcentaje en masa de CBCA en la mezcla cementante a valores de 85, 80, 75 y 70%.
- Temperatura inicial de curado (TIC): Fue la temperatura de curado a la cual se sometieron los morteros inicialmente por un tiempo de 2 h, con 3 niveles: 35 °C, 50 °C y 100 °C.
- Relación agua/ligante (a/l): Esta es la relación que existe al momento de preparar una pasta o un mortero, es decir, la cantidad de agua dividida entre la cantidad de base cementante. Por ejemplo, una relación a/l de 0.5 significa que se utiliza 1 kg de agua por cada 2 kg de cemento. Se consideró esta variable ya que surge como respuesta a las recomendaciones de (Rivera-Meza, 2017). Los niveles considerados fueron: 0.25, 0.30 y 0.35.

De esta forma el diseño experimental se representa en la Tabla 1. El arreglo corresponde a un experimento L_{18} ($6^1 \times 3^2$). El software utilizado fue Minitab 19.

Tabla 1. Arreglo ortogonal Taguchi L_{18} ($6^1 \times 3^2$).

Mezcla	Composición	%CBCA	% CaO	% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	TIC	a/l
M1	85-10-5	85.00	10.00	5	35	0.25
M2	1 85-10-5	85.00	10.00	5	50	0.30
M3	85-10-5	85.00	10.00	5	100	0.35
M4	80-15-5	80.00	15.00	5	35	0.25
M5	2 80-15-5	80.00	15.00	5	50	0.30
M6	80-15-5	80.00	15.00	5	100	0.35
M7	75-20-5	75.00	20.00	5	35	0.30
M8	3 75-20-5	75.00	20.00	5	50	0.35
M9	75-20-5	75.00	20.00	5	100	0.25
M10	80-10-10	80.00	10.00	10	35	0.35
M11	4 80-10-10	80.00	10.00	10	50	0.25
M12	80-10-10	80.00	10.00	10	100	0.30
M13	5 75-15-10	75.00	15.00	10	35	0.30
M14	75-15-10	75.00	15.00	10	50	0.35

M15		75-15-10	75.00	15.00	10	100	0.25
M16		70-20-10	70.00	20.00	10	35	0.35
M17	6	70-20-10	70.00	20.00	10	50	0.25
M18		70-20-10	70.00	20.00	10	100	0.30

Se consideró como variable respuesta la resistencia mecánica a compresión (RMC) medida a los 28 días de curado (en seco) en una máquina universal de ensayos mecánicos. Además, se identificó posibles productos de reacción mediante la técnica de Infra rojo por Transformada de Fourier (FT-IR).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta la imagen del producto obtenido, de color oscuro y apariencia sólida, con cierta porosidad.



Figura 1. Producto cemento supersulfatado a partir de ceniza de bagazo de caña, cal y sulfato de calcio

En la tabla 2 se pueden ver que las 3 mejores mezclas fueron: M10, M7, M4, con valores de RMC (en MPa) de 10.75, 6.46 y 5.69 respectivamente, ya que el resto de mezclas se mantuvieron con valores promedios iguales o menores a 4 MPa. Se puede apreciar, por simple inspección de estos valores, que, para el caso de la TIC, en las 3 mezclas coincide con la temperatura de 35 °C, es decir, el nivel más bajo considerado, lo cual es contradictorio con la bibliografía, por ejemplo, Cabrera Luna et al. (2021) estudiaron el comportamiento de aglutinantes supersulfatados basado en materiales volcánicos encontrando una TIC óptima de 60 °C. Sin embargo, este comportamiento tiene mucho sentido, ya que se trabajó con relaciones agua/ligante relativamente bajas y al tener una temperatura mucho menor a 60 °C favoreció las reacciones de hidratación, siendo lentas, pero más completas que a 50 °C y 100 °C.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión a 28 días, tomando en cuenta que los valores reportados representan un promedio de 3 mediciones cada uno.

Tabla 2. Resultados de resistencia mecánica a la compresión

Mezcla	Resistencia Promedio [MPa]	Desviación Estándar [MPa]
M1	2.91	± 0.0404
M2	2.57	± 0.2193
M3	2.67	± 0.0808
M4	5.69	± 1.1709
M5	2.89	± 0.0700
M6	3.61	± 0.3338
M7	6.46	± 1.5583
M8	4.00	± 0.3582
M9	2.90	± 0.0650
M10	10.75	± 0.1852
M11	3.22	± 0.5937
M12	3.12	± 0.1457
M13	3.26	± 0.1069
M14	3.40	± 0.1559
M15	2.81	± 0.0404
M16	2.64	± 0.0404
M17	3.10	± 0.1400
M18	2.83	± 0.1155

En la Figura 2 se muestra que la mezcla óptima (MO) es aquella con la composición número 4 (80% CBCA, 10% CaO, 10% SC), curada a temperatura ambiente (~35 °C) y con una relación a/l de 0.35. De la Tabla 1 se puede observar que la mezcla óptima (MO) se corresponde con la mezcla M10, con una RC a 28 días de ~ 11 MPa (Ver Tabla 2). En la Figura 2 se presentan los efectos principales de las variables de estudio y sus niveles a la RMC.

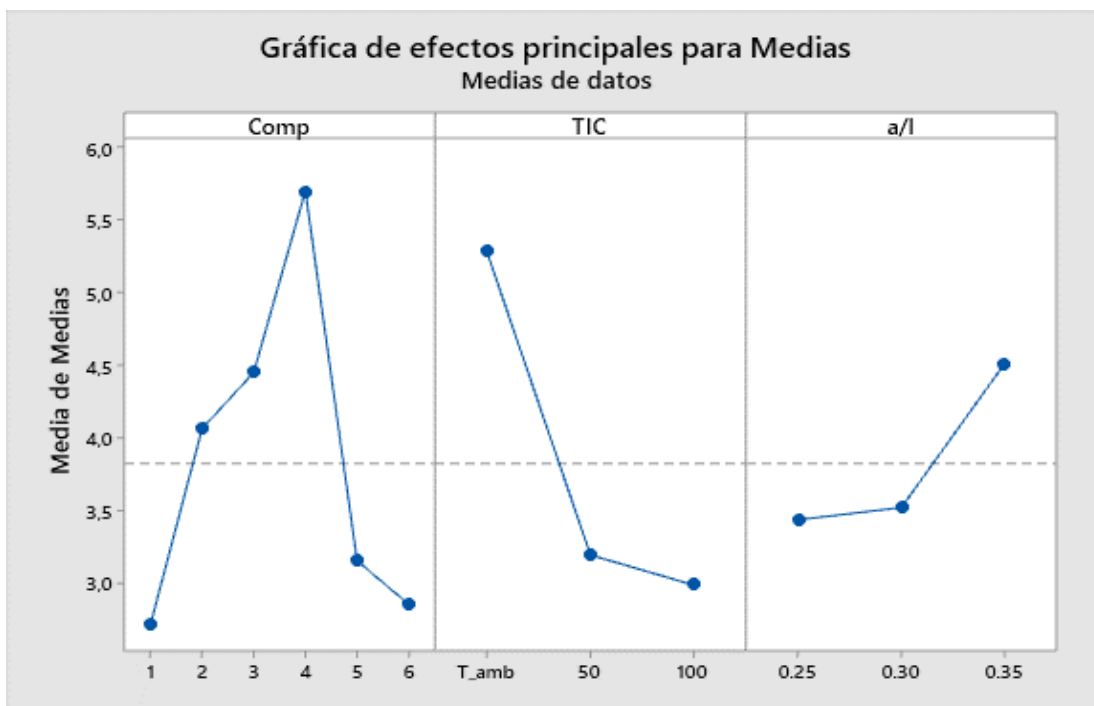


Figura 2. Gráfica de efectos principales sobre la RC.

Cabrera-Luna et. al (2021) reportaron resultados de resistencia a la compresión de 25 MPa a 28 días de curado a 60 °C en cámara isotérmica con humedad relativa controlada. Sin embargo, dichos investigadores utilizaron anhidrita (CaSO_4) y ceniza volcánica en sus formulaciones, lo que supone una química de reacción diferente a la presente investigación. Por tanto, las altas resistencias a la compresión reportadas por Cabrera-Luna y colaboradores se atribuyen al uso de anhidrita como activador sulfático (en vez de dihidrato) y a una temperatura de curado de 60 °C, además de utilizar ceniza volcánica como precursor cementoso.

El silicato de calcio hidratado o gel CSH ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, sin denotar la estequiometría) es el principal producto de la hidratación del cemento Portland y es el principal responsable de la resistencia de los materiales a base de cemento (Richardson, 2008). Para comprobar la formación de gel CSH y a la vez, tener un control experimental sobre las mezclas fabricadas, se procedió a realizar pastas de la mezcla óptima (MO). La composición de las pastas se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Controles sin CaO y SC.

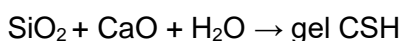
Control	%CBCA	%CaO	% $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	TIC (°C)	Relación a/l
CBCA+SC	90	0	10	35	0.35
CBCA+CaO	90	10	0	35	0.35

Dichas formulaciones resultan de la mezcla óptima (MO) o M10 (80%CBCA, 10%CaO y 10% $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), eliminando uno de los insumos en la mezcla ternaria original, se tiene que compensar el % faltante por CBCA. Se utilizó el plastificante al 1% m/m. Los resultados de las RMC de dichos a controles a 28 días se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. RCM promedio de controles sin CaO y CaSO₄·2H₂O a 28 días

Control	RMC promedio [MPa]
CBCA+CaO	7.72
CBCA+SC	1.38
CBCA+CaO+SC	11

Los resultados son acordes a la teoría de las reacciones de hidratación del cemento supersulfatado. Para el caso del control sin CaSO₄·2H₂O, posiblemente se obtuvo un gel CSH como producto de reacción, por esa razón mostró una mayor resistencia que el caso del control sin CaO, según la reacción siguiente:



Es evidente que la presencia de sulfato de calcio en la mezcla ternaria acelera las reacciones de hidratación de la SiO₂ de la CBCA y el CaO, para la formación de CSH.

En la Figura 3 se muestra el espectro IR de transmitancia para la mezcla óptima (MO) a 28 días. Como ya se había dicho, este ensayo consiste en la Mezcla 10 del diseño experimental (80% CBCA, 10% CaO, 10% CaSO₄·2H₂O, relación a/l de 0.35 y una TIC de 35° C).

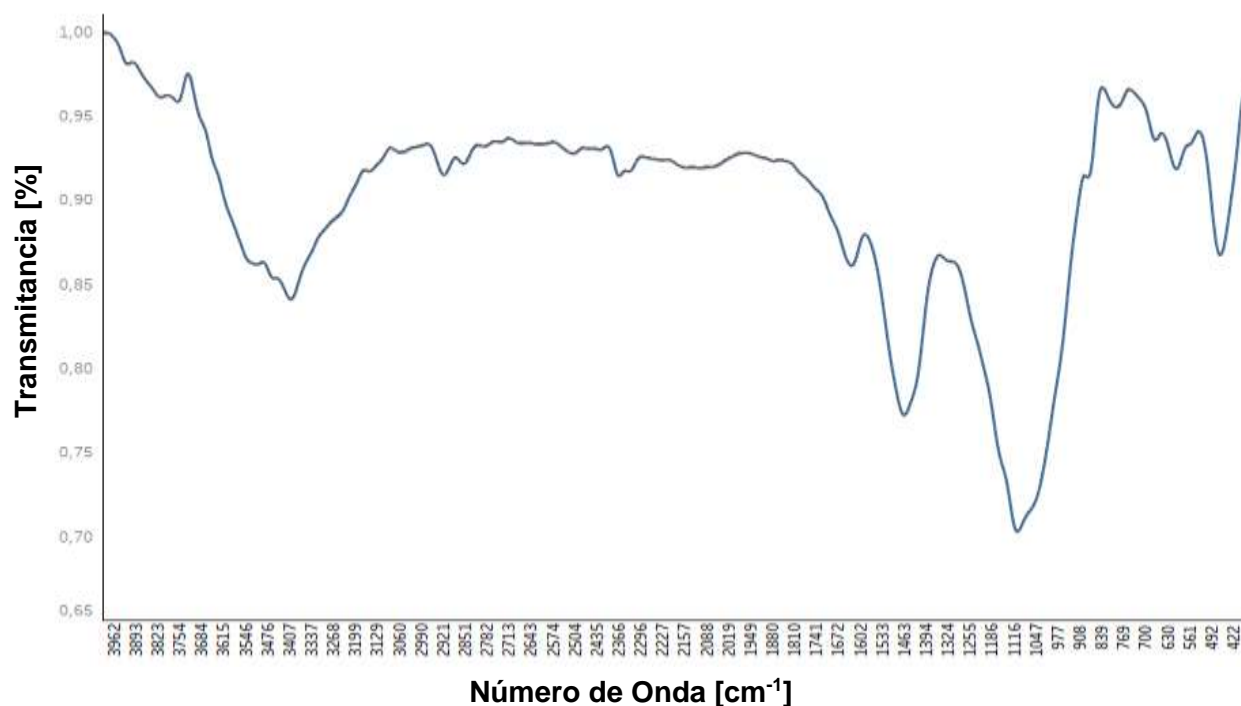


Figura 3. Espectro IR de la mezcla óptima a 28 días

El análisis del espectro IR comienza por la banda de absorción del enlace O-H, en el intervalo de frecuencia de los 3200 a 3600 cm⁻¹, en la cual se identifica el compuesto H₂O que posee una

vibración del tipo *stretching* o estiramiento simétrico. Esto es importante conocer, ya que, la presencia de agua significa que las reacciones de hidratación aún no han finalizado al no agotarse este reactivo y que puede dar valores de RMC más altas con el paso del tiempo. En la banda de 1600 a 1700 cm^{-1} se aprecia un hombro que es atribuible al agua en los sulfatos, en este caso al sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), lo que es un indicio de que no todo este reactivo se agotó, de acuerdo con Piqué y Vásquez, (2012). Según Nguyen Ngoc (2018) y Vásquez y Blanco (1981) a estas frecuencias, el $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ posee intensidad media cercana a 1600 cm^{-1} y débil después de 1700 cm^{-1} por lo que se confirma lo dicho anteriormente.

En la banda desde 1300 a los 1600 cm^{-1} , aparece la etringita, ya que para estas frecuencias tiene una intensidad muy fuerte y banda ancha de acuerdo con Nguyen Ngoc (2018) y con Vásquez y Blanco (1981). Es importante mencionar que, la etringita es un reactivo intermedio en las reacciones de hidratación de la mezcla cementante, según Jian-wei Zhou et al. (2022) y Mindess y Young (1981), y constituye hasta un 20% de la pasta endurecida.

En la banda de los 900 a los 1200 cm^{-1} la sílice (SiO_2) tiene una asignación posible de acuerdo con las dos referencias mencionadas en este párrafo. Específicamente en forma de gel de sílice ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Esto es un hallazgo importante ya que corrobora siempre el hecho de que aún se dispone del material silicio de la CBCA, lo que es un punto de mejora. Según Vásquez y Blanco (1981) y Piqué y Vásquez (2012) en la banda de los 700 a los 900 cm^{-1} se puede encontrar a compuestos con enlaces Al-O, como el $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ o C_4AF (Ferroaluminato tetracálcico) que en ese intervalo de frecuencia tiene intensidades medias. Este compuesto reacciona con yeso y agua para producir etringita, hidróxido de aluminio férrico y cal, por lo que es posible tener a mezclas de estos compuestos, por la relación de reactivo limitante-reactivo en exceso y porque las reacciones no son completas.

De acuerdo con Piqué y Vásquez (2012) en la región de frecuencia de los 400 a 700 cm^{-1} ocupan una asignación posible los silicatos y que puede indicar la presencia de un silicato cálcico hidratado (CSH) que puede ser de la forma C_3S o C_2S , Vásquez y Blanco (1981). La formación de este compuesto posiblemente fue unas concentraciones no muy altas (menos del 50%) debido a las resistencias que no son tan altas. Mindess y Young (1981) afirma que los CSH constituyen entre un 50 y 60% de la pasta endurecida y tienen un fuerte impacto sobre la RMC, por lo que es de esperarse la formación de estos compuestos a bajas concentraciones.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un cemento supersulfatado base ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) activado con óxido de calcio (CaO) y sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), obteniéndose un valor máximo de resistencia mecánica a la compresión (RMC) de 10.75 MPa a 28 días de curado para la mezcla ternaria con composición másica 80%-10%-10% (CBCA- CaO - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Se determinó que el CaO tuvo un mayor efecto sobre la RMC con respecto al $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, obteniéndose un promedio de 7.72 MPa, para el ensayo sin $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, en relación con el promedio de 1.38 MPa para el ensayo sin CaO , debido a la posible formación de etringita en el

control sin CaO, lo que posiblemente disminuyó la RMC y no produjo gel CSH. Mediante la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier se pudieron identificar productos de reacción tales como cal viva, etringita, gel de sílice y potencialmente CSH, para la mezcla óptima.

Considerando que el cemento Portland normalmente tiene una resistencia mecánica a la compresión de alrededor de 40 a 70 MPa, dependiendo de la mezcla y condiciones de curado, el cemento elaborado en la presente investigación podría tener aplicaciones no estructurales tales como pavimento en senderos y caminos para peatones o ciclistas, sin embargo, más investigación es necesaria a fin de optimizar los valores de resistencia a compresión obtenidos y poder ofrecer aplicaciones estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Universidades (CNU) de Nicaragua por haber financiado el proyecto “Aportación a la industria azucarera nicaragüense mediante la valorización de ceniza de bagazo de caña para el desarrollo de materiales de construcción sustentable”, bajo la Convocatoria de Fondos Concursables de Investigación 2022. Los autores además agradecen a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Nicaragua, por el apoyo técnico en el laboratorio de Materiales y Suelos de la Facultad de Tecnología de la Construcción (FTC) y el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ). Por último, los autores agradecen al Ingenio Monte Rosa, Chichigalpa, Nicaragua, por brindar la materia prima para desarrollar el trabajo experimental, y por su apertura a esta investigación.

REFERENCIAS

- Cabrera-Luna, K., Maldonado-Bandala, E. E., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P., Perez-Cortes, P., y Escalante García, J. I. (2021). Supersulfated cements based on pumice with quicklime, anhydrite and hemihydrate: Characterization and environmental impact. *Cement and Concrete Composites*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104236>
- Ingenio Monte Rosa. (2021). Grupo Pantaleón. Comité Nacional de Productores de Azúcar Nicaragua. <https://cnpa.com.ni/monte-rosa/>
- Lozada, J., Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CIENCIAMÉRICA*, N° 3, diciembre 2014, pp (34-39) Universidad Tecnológica Indoamérica.
- Mindess, S., Young, J.F. *Concrete*, cap.4. USA, Prentice-Hall Inc., 1981.
- Nguyen Ngoc Lam 2018 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 143 (2018) 012016. doi :10.1088/1755-1315/143/1/012016

Piqué, T., y Vásquez, A. (2012). Uso de la Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 62-71.

Richardson I. G. (2008), The calcium silicate hydrates, *Cement and Concrete Research* vol. 38, p. 137-158.

Vásquez, T., y Blanco, M. (1981). Tabla de frecuencias y espectros de absorción infrarroja de compuestos relacionados con la química del cemento. *Materiales de Construcción*.

Zhou J., Yu B., Kong Y., Yang W., Cheng B., Wu J. Effect of calcium hydroxide on the microstructure and performance of super sulfated cement. *Ceramics-Silikáty* 66 (1), 85-94 (2022). doi: 10.13168/cs.2022.0003

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Léster Javier Espinoza Pérez: Es Ingeniero Químico, Con Maestría en Ciencias en Ingeniería Cerámica. Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica y Docente Universitario por más de 11 años.

Kenneth Missael Carmona Guido: Es Ingeniero Químico/Máster Black Belt/Analista de datos. Actualmente se desempeña como director de mejora continua en el Matadero San Martín, Nicaragua.

Jerry Moisés Lacayo Álvarez: Es Ingeniero Químico. Actualmente se desempeña como Analista fisicoquímico en Laboratorios CEGUEL, Nicaragua