

## Cementos alcalinos de bajo impacto ambiental base residuos de vidrio-caliza

Dr. Ulises Avila López<sup>1</sup>, Dra. Marisol Gallardo Heredia<sup>2</sup>, Dra. Erika Martínez Sánchez<sup>3</sup>

**Resumen:** Se estudió el efecto del módulo de sílice ( $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) del agente activador sobre las propiedades mecánicas, microestructura y productos de reacción de pastas preparadas con cemento base residuos de vidrio-caliza. Las pastas se prepararon con una mezcla de residuos de vidrio y agregado fino de caliza. El  $M_s$  del silicato de sodio se modificó a 0.5, 1.0 y 1.5 mediante la adición de NaOH y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a la solución activadora. Los resultados mostraron que la variación del  $M_s$  no tiene efectos significativos sobre el desarrollo de las propiedades mecánicas, pero puede reducir el tiempo de trabajabilidad de las pastas. El uso de temperaturas mayores a 40° C promovió el fraguado de las pastas y evito la segregación. Los principales productos de reacción amorfos y promotores de las propiedades mecánicas fueron C-S-H, N-C-S-H, N-S-H y gel de sílice íntimamente entremezclados, los cuales conformaron la matriz de la microestructura. Las fases cristalinas identificadas fueron gaylussita, pirssonita y termonatrita.

**Palabras clave:** Activación alcalina, caliza, vidrio, silicato de sodio.

### Introducción

Como resultado de las diferentes actividades productivas de las sociedades, se generan inevitablemente diversos tipos de desechos sólidos, líquidos o gaseosos que pueden tener efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana. En México el 52% de los residuos son de naturaleza orgánica y el restante son residuos inorgánicos como el papel y cartón (14%), vidrio (6%: 2.4 millones de toneladas), plástico (11%), textil (1%), metal (3%) y otros tipos de residuos (17%). A la fecha, la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) son los rellenos sanitarios; sin embargo, aun cuando el 93% de los municipios que conforman el país cuentan con servicio de recolección y disposición final de RSU, es común que los residuos se confinen en depósitos cercanos a las vías de comunicación o en depresiones naturales del terreno, como cañadas, barrancas y cauces de arroyos (Semarnat, 2013 e INEGI, 2010).

El vidrio de los RSU es un material relativamente inerte que no daña la naturaleza; sin embargo, ocupa un volumen mayor que otros tipos de residuos en los rellenos sanitarios. Por otro lado, el reciclado de éste por la industria vidriera se dificulta por diversos factores, como la gran diversidad de vidrios de composición química y coloración variada. Dichos problemas causan alteraciones en los procesos convencionales de fabricación del vidrio. No obstante, los RSU vítreos pueden convertirse en un área de oportunidad posibilitando su reutilización en forma de cementos útiles para la construcción (Puertas et al. 2012 y Avila-López, 2010). En la literatura, se indica que es posible utilizar el vidrio de los RSU en materiales asociados al cemento Portland, como sustituto parcial del cemento Portland, micro relleno, agregado en morteros y concretos. Esto es posible debido a que el vidrio común está constituido esencialmente por sílice y es susceptible a la activación por compuestos alcalinos y dependiendo de la disponibilidad de calcio, puede formar gel de sílice o silicato de calcio hidratado (C-S-H) (Bunker et al. 1983, Escalante-García et al., 2002, Vega-Cordero et al. 2011). Para usar los residuos de vidrio como un cementante hidráulico, es necesario compensar la deficiencia de CaO en éste para favorecer la formación del C-S-H, que es la fase cementante característica del cemento Portland; esto se puede lograr combinando el desecho de vidrio con una fuente rica en calcio, como la caliza.

La caliza es una roca abundante en la corteza terrestre que representa una interesante opción como materia prima en los cementos alternativos. Sin embargo, aun cuando el cemento Portland se conforma aproximadamente del 80% de caliza, los estudios orientados al uso de ésta sin calcinación como reemplazo principal del cemento Portland son escasos. El desarrollo de un cemento de caliza en combinación con vidrio de los RSU resulta prometedor, debido a que sería posible utilizar activadores químicos convencionales que permitan obtener soluciones activadoras con pH alto (para activar al vidrio) y presencia de  $\text{CO}_2$  (para activar la caliza), lo que daría a lugar a la activación conjunta del vidrio y la caliza, formando gel de C-S-H y el desarrollo de propiedades cementosas. Con base en lo anterior, en este trabajo de investigación se propuso desarrollar un cemento de bajo impacto ambiental a base de vidrio-caliza utilizando la activación química, que permita reemplazar de forma total al cemento Portland.

<sup>1</sup> Ulises Avila López es Profesor de carrera de tiempo completo Titular C, SNI Candidato, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC), México. [ulises.avila@uadec.edu.mx](mailto:ulises.avila@uadec.edu.mx) (autor corresponsal).

<sup>2</sup> Marisol Gallardo Heredia es Profesora de carrera de tiempo completo Titular C, SNI Candidato, en la UAdeC, México. [marisol.gallardo@uadec.edu.mx](mailto:marisol.gallardo@uadec.edu.mx)

<sup>3</sup> Erika Martínez Sánchez es Profesora de carrera de tiempo completo Titular C, SNI Candidato, en la UAdeC, México. [erika.martinez@uadec.edu.mx](mailto:erika.martinez@uadec.edu.mx)

### Desarrollo experimental

Se utilizó una mezcla de residuos vítreos urbanos (vidrio) y agregado de caliza como materias primas, éstas fueron activadas con soluciones alcalinas de silicato de sodio. El vidrio se obtuvo de los residuos sólidos urbanos locales. Debido a las condiciones sanitarias y características físicas del vidrio, fue necesario lavar, clasificar, triturar, homogenizar, moler y tamizar este material previo a utilizarlo. El agregado de caliza estándar No. 4 se adquirió de un proveedor local. Ésta fue sometida a un proceso de secado, molienda y tamizado. Ambas materias primas fueron sometidas a molienda hasta pasar el tamiz #325 (45  $\mu\text{m}$ ). Estas materias fueron activadas químicamente mediante el uso de soluciones alcalinas.

Como activador se usó silicato de sodio en forma líquida (Silicatos solubles de Monterrey S.A.), con una composición química en peso de 14.7% de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  de 29.5% y 55.9% de agua (Módulo de sílice  $[\text{Ms}] = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2$ ). El módulo se ajustó a 0.5, 1 y 1.5 mediante la adición de  $\text{NaOH}$  o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (modificadores del Ms). Las soluciones se prepararon mediante la disolución de  $\text{NaOH}$  o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en agua destilada, posteriormente se adicionó el silicato de sodio; la solución se utilizó hasta que su temperatura fue de 35-40 °C. La cantidad de silicato de sodio líquido y modificador se ajustó acorde a los requerimientos de las formulaciones deseadas, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores y valores propuestos para la preparación de pastas activadas con silicato de sodio.

CaO/SiO <sub>2</sub>	Activador	Modificador del Ms	Módulo	%Na <sub>2</sub> O	A/C	°T <sub>curado</sub>	Tamaño de partícula
0	Na <sub>2</sub> O·SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaOH	0.5, 1.0, 1.5	9	0.4	60-40 °C	Malla No. 325
0.5	Na <sub>2</sub> O·SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaOH	0.5, 1.0, 1.5	9	0.4	60-40 °C	Malla No. 325
1.0	Na <sub>2</sub> O·SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaOH	0.5, 1.0, 1.5	9	0.4	60-40 °C	Malla No. 325
1.5	Na <sub>2</sub> O·SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaOH	0.5, 1.0, 1.5	9	0.4	60-40 °C	Malla No. 325

Las pastas cementosas se prepararon en lotes de 1.2 kg. usando una mezcladora de paleta con movimiento planetario. Se adicionó el vidrio al total de la solución activadora y se mezcló durante 5 min, y posteriormente se adicionó la caliza y se mezcló hasta homogenizar la pasta. En un estudio previo (Avila-López, 2010) y en pruebas preliminares se observó que la activación inicial de una fracción del cementante puede favorecer el desarrollo de resistencia a la compresión. Las pastas se vaciaron en moldes de nylacero de 2.5x2.5x16 cm, y en seguida se vibraron para remover el aire atrapado y distribuir homogéneamente la pasta en el molde. Posteriormente, las barras de las pastas se mantuvieron en cámaras isotérmicas de 60 (fraguado de 24 h) y 40 °C (curado posterior) durante los tiempos indicados para cada formulación. Las pastas se desmoldaron después de 24h y se cubrieron con franelas húmedas hasta que se almacenaron en contenedores de plástico y se sometieron a curado a 40° C. El curado de las pastas fue en seco.

La resistencia a compresión que se reporta corresponde al promedio de la resistencia de 5 cubos de 2.5 cm con 28 días de curado; para obtener los cubos las barras fueron cortadas con disco de diamante y sin utilizar refrigerante para evitar la hidratación de las muestras. Muestras selectas fueron pulverizadas en un molino planetario hasta pasar el tamiz #100 (150  $\mu\text{m}$ ) y caracterizadas por difracción de rayos X (X'pert 3040, Phillips) y análisis térmico (Linseis, STA PT 1600 TG-DSC); la caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM, Phillips XL-30 ESEM) se realizó en fragmentos de muestras que no fueron sometidas a ensayos a compresión, los fragmentos fueron montados en resina epoxi, devastados con papel de SiC y pulidos con pasta de diamante de 3 y 1.5  $\mu\text{m}$ ; previo a su análisis fueron recubiertas con grafito.

### Resultados y Discusión

#### Materias primas

En el cemento Portland (cemento convencional) la fase que promueve las propiedades mecánicas características es el C-S-H ( $\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , de estequiometría variada), por tal motivo, en el presente estudio se utilizó el vidrio como fuente de  $\text{SiO}_2$  y el agregado de caliza como fuente de  $\text{CaO}$ . En la Tabla 2 se muestra la composición química de las materias primas, la cual se analizó por el método semicuantitativo de espectrometría de fluorescencia de rayos

X (FRX) con dispersión de longitud de onda (BRUKER, S4 PIONNER). Los resultados muestran que las materias primas están conformadas principalmente por los óxidos SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O y CaO, lo cual sugiere que es altamente posible que se forme el C-S-H durante las reacciones de disolución-saturación-precipitación, y que la presencia del Na<sub>2</sub>O podría promover una mayor eficiencia en la disolución del vidrio. La caracterización por otras técnicas se muestra en secciones posteriores como referencias.

Tabla 2. Composición química de la mezcla de vidrio y el agregado de caliza mediante análisis por FRX.

Mat. Prima	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaCO <sub>3</sub>
Vidrio (Vd)	70.34	13.58	12.76	1.52	0.525	0.397	0.35	-
Caliza (CLZ)	1.44	0.132	-	0.318	0.106	0.124	0.457	97.29

*Resistencia a la compresión (RC)*

En la Figura 1 se muestra el efecto de la relación CaO/SiO<sub>2</sub> (C/S) y el Ms en pastas con NaOH como modificador del Ms; se incluye como referencia la resistencia a compresión de 28 días una pasta de cemento Portland (CP) con una relación A/C = 0.4 y curada a 40 °C. A 28 días de curado se observó que el incremento en la relación C/S redujo las propiedades mecánicas; donde el sistema con C/S=0 desarrolló la mayor resistencia (44.6-49.7 MPa) y el sistema con C/S=1.5 la menor, con 6.4-22.9 MPa. Dicho comportamiento sugiere que las propiedades mecánicas en las etapas iniciales podrían estar gobernadas por el grado de reacción del vidrio; al aumentar la relación C/S, la cantidad de vidrio se reduce y la caliza aumenta, reduciendo el volumen de especies cementosas procedentes del vidrio (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> y Ca<sup>2+</sup>) y por ende el desarrollo mecánico. A 360 días de curado las pastas con C/S=1.5 presentaron las propiedades mecánicas más bajas; las pastas con Ms=0.5 y 1 para C/S=0 y 0.5, respectivamente, mostraron la mayor resistencia con 64.4 y 64.3 MPa. En general, el efecto de la relación C/S fue relativamente similar al observado a 28 días, con excepción de las pastas de la C/S=0, que fueron afectados por el incremento del Ms.

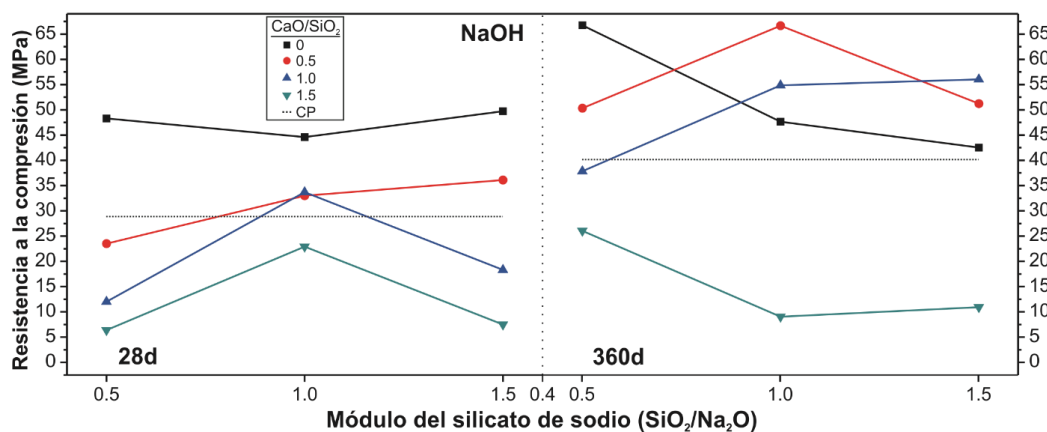


Figura 1. Efecto del módulo del silicato de sodio y relación CaO/SiO<sub>2</sub> sobre las propiedades mecánicas al usar NaOH como modificador del Ms. A/C=0.4, %Na<sub>2</sub>O=9, T°<sub>curado</sub>=60-40° C.

En la Figura 2 se muestran los efectos de la relación CaO/SiO<sub>2</sub> y del Ms sobre la resistencia a la compresión a 28 y 360 días de curado de pastas en las que se utilizó Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> como agente modificador del Ms; como referencia, se incluyó la resistencia a 28 días de curado de una pasta de CP, similar a la presentada en la Figura 1. Para la serie de sistemas preparados con Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se dio seguimiento a 5 pastas, las restantes se descartaron debido a que no fraguaron o presentaron segregado significativo de la solución activadora. Los sistemas a los que se dio seguimiento fueron los que presentaron bajo o nulo segregado de la solución. Se observó que la resistencia a compresión decreció con el aumento del Ms (≈9 MPa) y de la relación CaO/SiO<sub>2</sub>, lo que sugiere que el aumento de la sílice aportada por el activador limita las reacciones de las materias primas debido a las capas de sílice que se forman sobre las partículas de estos. Las pastas con relación CaO/SiO<sub>2</sub>=0 superaron la resistencia de la pasta de CP; sin embargo, debido al segregado de la solución activadora, se desconoce la formulación final de dichas pastas y no es posible asegurar la reproducibilidad de dichas propiedades mecánicas. Los resultados mostrados sugieren que el NaOH es preferible para el desarrollo de este tipo de cementos; sin embargo, acorde a la experiencia del equipo de trabajo de la Facultad de Ingeniería de la UAdeC, se ha observado que el comportamiento mecánico de estos cementos varía en función del contenido de agua y tipo de modificador del Ms (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

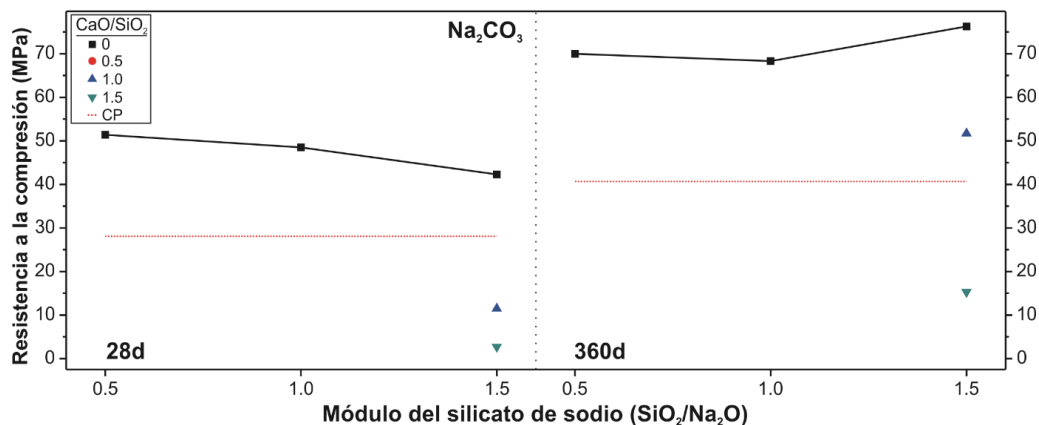


Figura 2. Efecto del módulo del silicato de sodio y relación CaO/SiO<sub>2</sub> sobre las propiedades mecánicas al usar Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> como modificador del Ms. A/C=0.4, %Na<sub>2</sub>O=9, T°curado=60-40° C.

### Difracción de rayos X

La Figura 3-A muestra los resultados de pastas con Ms=1.5 y CaO/SiO<sub>2</sub>=0 (sin caliza y con la mayor adición de sílice en el agente activador). El vidrio presentó un halo amorfo entre 15-40° 2θ y los ligantes un halo amorfo ubicado entre 18-36° 2θ. El decremento de intensidad, cambio de forma y desplazamiento del halo amorfo con respecto al vidrio, sugieren la presencia de nuevos productos después de las reacciones, derivados de la posible formación de C-S-H, N-C-S-H ([Na<sub>2</sub>O, CaO]-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, estequiometría variada), gel de sílice y por la presencia de agente activador remanente (N-S-H, Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O). Los patrones de difracción presentaron características similares entre 28 y 360 días; ambas pastas presentaron reflexiones características de la gaylussita (Na<sub>2</sub>Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·5H<sub>2</sub>O), las cuales no mostraron cambios significativos por efecto del tiempo de curado; lo que sugiere que solo existen las condiciones para su formación en las primeras fechas de curado, cuando hay alto contenido de Na<sub>2</sub>O.

En la Figura 3-B se muestran los patrones de difracción de las pastas con CaO/SiO<sub>2</sub>>0 (pastas con caliza) con 28 días de curado (los difractogramas fueron similares en fechas previas y posteriores). Las pastas con Ms<1.5 sólo presentaron reflexiones de calcita procedente de la materia prima. En las pastas con Ms=1.5 se identificaron las reflexiones características de la termonatrita (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O); dicha fase se identificó en pastas con ambos modificadores de Ms. Se asume que su formación se originó por la interacción del Na<sub>2</sub>O del medio activador con el CO<sub>2</sub> procedente de la disolución de la caliza o del medio ambiente.

La carbonatación de los productos de reacción podría dar dos resultados: 1) la formación de la gaylussita o termonatrita, puede ayudar a rellenar poros de la microestructura reduciendo su permeabilidad y mejorando su estabilidad estructural y resistencia química; 2) dichas fases podrían originar tensiones en la microestructura reduciendo la estabilidad estructural en fechas de curado tardías. El caso 1, se considera que no es nocivo debido a que se formaría en las etapas iniciales de curado, cuando la concentración de Na libre es alta y la estructura aún no está consolidada. El caso 2, sería dañino, ya que podría resultar en la formación de grietas y el decremento significativo de las propiedades mecánicas. Los resultados hasta 360 días sugieren que se presentó el caso 1, donde la formación de la termonatrita y gaylussita son favorables.

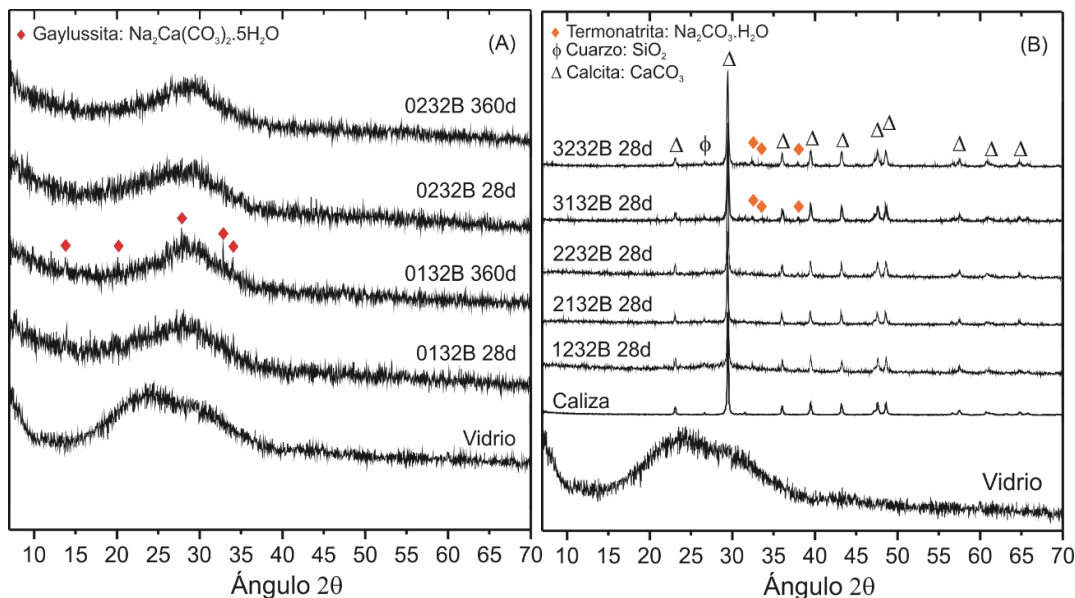


Figura 3. Patrones de DRX de pastas selectas con relación CaO/SiO<sub>2</sub> variada.

*Microscopía electrónica de barrido (MEB)*

En la Figura 4 se muestra la microestructura de la pasta activada con CaO/SiO<sub>2</sub>=0.5, Ms=1.5 y utilizando NaOH como modificador, la cual fue la que desarrolló la mayor resistencia a 28 días de curado de las pastas con CaO/SiO<sub>2</sub>>0. La microestructura fue relativamente densa y homogénea con partículas sin reaccionar de caliza y vidrio. La porosidad corresponde a partículas de vidrio desprendidas durante el desbaste y pulido. Las partículas de vidrio mostraron anillos de productos de reacción, lo que sugiere que la formación de dicha capa es necesaria para la unión del vidrio debido al avance de las reacciones, lo que favoreció las propiedades mecánicas, sugiriendo la formación de fases con propiedades cementosas. La presencia de partículas de caliza que aparentan estar conformadas por múltiples partículas de menor tamaño, está asociado a un efecto de las reacciones de disolución o decalcificación de este material (Oates A., 1998). Las grietas que se observan en la microestructura están asociadas al proceso de secado de las muestras durante su preparación o durante su estancia al vacío en la columna del microscopio, este fenómeno se acentúa en zonas o pastas con alto contenido de gel de sílice, como la matriz de las pastas descritas o en las activadas con silicato de sodio (Avila-López, 2010; y Burciaga-Diaz et. al., 2013).

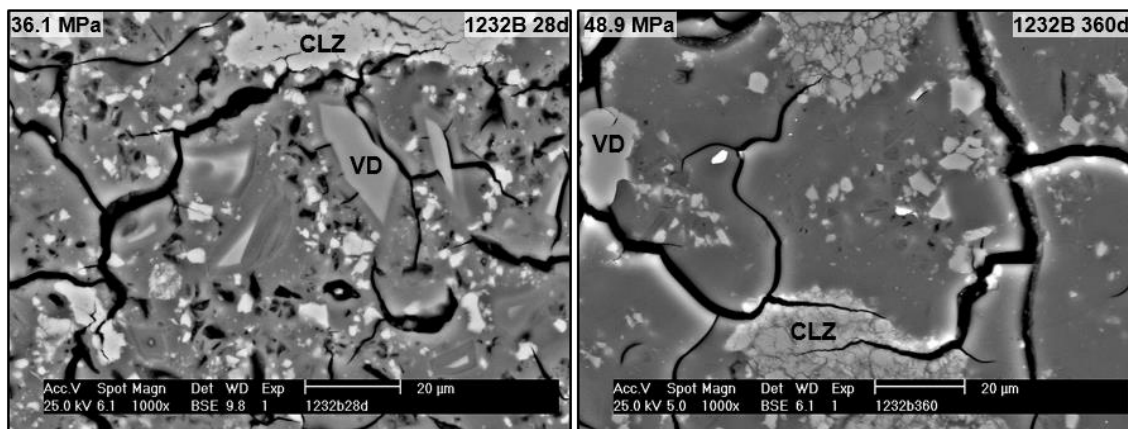


Figura 4. Microestructura de la pasta actividad con NaOH, CaO/SiO<sub>2</sub>=0.5 y Ms=1.5.

*Análisis térmico (AT)*

En la Figura 5 se muestran los resultados de DSC de las pastas que desarrollaron la mayor resistencia a compresión a 28 días de curado; CaO/SiO<sub>2</sub>=0 (0232B) y 0.5 (1232B), NaOH y Ms=1.5. La pasta 0132B (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) se analizó para evaluar el efecto del agente modificador sobre los productos de reacción en pastas con CaO/SiO<sub>2</sub>=0. Las pastas 0132B

y 0232B con 28 días de curado y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaOH}$  como modificadores del Ms, respectivamente, presentaron un pico endotérmico a  $93^\circ\text{C}$  que en combinación con el pico endotérmico ubicado en  $878^\circ\text{C}$  en la pasta 0132B, sugieren que el primer pico podría asociarse a la descomposición del C-S-H y termonatrita ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), esta última identificada por DRX en varias pastas; mientras el pico en  $878^\circ\text{C}$  se asocia a la descomposición del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Stuedel A. et al. 2013 y Simanjuntak W. et al. 2014). En la pasta 1232B con 28 días de curado, el primer pico en  $83^\circ\text{C}$  indica descomposición de C-S-H y no de una combinación de picos. Adicionalmente se identificó un pico asociado con la descomposición de los carbonatos dobles (1) en  $671^\circ\text{C}$  y de su fusión (c) en  $730^\circ\text{C}$ .

Después de 360 días de curado, se observó que en la pasta 0132B, el pico en  $93^\circ\text{C}$  decreció ligeramente, lo cual pudo deberse a que la concentración de C-S-H y termonatrita en los productos de reacción fue menor por la formación de otra fase, como el gel de sílice. En la pasta 0232B se notó que el pico a  $T < 100^\circ\text{C}$  se desplazó hacia la izquierda respecto a la misma pasta a 28 días, ubicándose en  $80^\circ\text{C}$ , lo que sugiere que la termonatrita pudo haberse descompuesto debido a que es una fase metaestable o que su formación y distribución en las muestras no es homogénea. Se identificó el pico asociado a la pirrsonita en  $169^\circ\text{C}$ ; así como un pico en  $750^\circ\text{C}$  asociado a la descomposición del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y del  $\text{CaCO}_3$ .

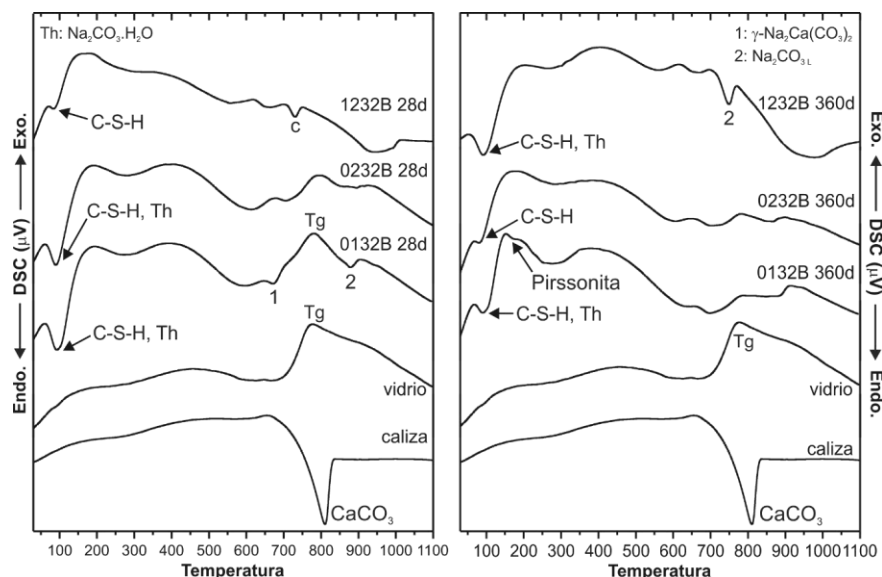


Figura 5. Análisis de calorimetría de barrido diferencial de pastas selectas con  $M_s=1.5$ ,  $A/C=0.4$  y curado de 28 360 días.

### Conclusiones

Acorde a los resultados obtenidos, la variación del Ms no tiene efectos significativos en el desarrollo de resistencia, pero el incremento de la viscosidad de las pastas puede reducir el tiempo de trabajabilidad; por otro lado, el incremento de la relación  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  reduce notablemente las propiedades mecánicas y favorece la segregación de las materias ligantes. Los principales productos de reacción amorfos y promotores de las propiedades debido a su contenido de sílice fueron C-S-H y algunas variedades de gel de sílice como N-S-H y N-C-S-H. Las fases cristalinas formadas fueron la termonatrita y los carbonatos dobles gaylussita y pirrsonita, las cuales no participan en el desarrollo de las propiedades mecánicas.

El uso de la relación agua/ligante (A/C) de 0.4 es benéfica cuando se utiliza  $\text{NaOH}$  como modificador del Ms, mientras que valores del A/C menores favorece el uso del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sobre el del  $\text{NaOH}$ .

Los resultados mostraron que el desarrollo de cementos base vidrio-caliza son prometedores como alternativa al cemento convencional; además de que permiten reducir el impacto ambiental causado por la industria cementera y ayudan a reducir el volumen de residuos vítreos que se destinan a los rellenos sanitarios, incrementando su vida útil.

### Referencias

- Avila-López U. "Preactivación alcalina de desechos inorgánicos mediante molienda, efecto sobre las propiedades y productos formados", *Tesis de Maestría en Ingeniería Cerámica*, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, 2010.
- Bunker B. C., Arnold G. W., Beauchamp E. K. "Mechanisms of alkali leaching in mixed Na-K glasses", *J Non-Cryst Solid*, Vol 58, 1983

- Burciaga-Diaz O., Magallanes-Rivera R. X., Escalante-García J. I., Alkali-activated slag-metakaolin pastes: strength, structural and microstructural characterization. *J. Sustain. Cem. Mater.* 2, 2013, p.p. 111-127.
- Escalante-García J. I., Palacios Villanueva V. M., Gorokhovskiy A. V., Mendoza-Suarez G., Fuentes A. F. "Characteristics of a NaOH activated blast furnace slag blended with a fine particle silica waste", *J Am. Ceram. Soc.*, Vol 85, No 7, 2002.
- INEGI. "Censo general de población y vivienda 2010". *Banco de información INEGI*, Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa. 2010.
- Oates A. H. J. "Lime and limestone: Chemistry and technology, production and uses", *Wiley-VCH*, New York (1998).
- Puertas M. F., Torres C. J. J., Varga F. C., Torres M. "Procedimiento para la fabricación de cementos alcalinos a partir de residuos vítreos urbanos industriales", *OMPI*, Patente WO 2012/172138 A1, 2012.
- Semarnat. "Informe de la situación del medio ambiente en México", *Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental*, México, 2013.
- Simanjuntak W., Sembiring S., Zakaria W. A., Pandiargan K. D. "The use of carbon dioxide released from coconut Shell combustion to produce Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>". *Makara J. Sci.*, Vol. 18, No. 3, 2014.
- Stuedel A., Mehl D. y Emmerich K. "Simultaneous thermal analysis of different bentonite-sodium carbonate systems: an attempt to distinguish alkali-activated bentonites from raw materials", *Clay Min.* Vol. 48, 2013.
- Vega-Cordero E. Gomez-Zamorano L. Y., Escalante-García J. I. "Synthesis of metakaolin-based geopolymers and the effect of the incorporation of geothermal silica waste" *Proc XIII International Congress on the Chemistry of Cement*; 2011 July; Madrid.

### Notas Biográficas

El Dr. Ulises Avila López es profesor de carrera de tiempo completo Titular C en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC). Obtuvo el grado de ingeniero en materiales en el Instituto Tecnológico de Morelia. Realizó sus estudios de maestría y doctorado en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo (Cinvestav). Tiene participaciones en congresos de nivel nacional e internacionales, es autor y coautor de diversos artículos y capítulos de libro de carácter científico, cuenta con una patente y ha dirigido tesis de licenciatura y maestría.

La Dra. Marisol Gallardo Heredia es profesor de carrera de tiempo completo Titular C en la Facultad de Ingeniería de la UAdeC, titulada en la Universidad Autónoma de Zacatecas como Ingeniero Químico. Realizó sus estudios de maestría en Ciencias en Ingeniería Cerámica y doctorado en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica en el Cinvestav. Cuenta con participación en congresos nacionales e internacionales, forma parte de un cuerpo académico, es autor y coautor de capítulos de libro de carácter científico y diversos artículos arbitrados e indexados, y ha generado recursos humanos de licenciatura y maestría.

La Dra. Erika Martínez Sánchez es profesor de carrera de tiempo completo Titular C en la Facultad de Ingeniería de la UAdeC. Estudió la licenciatura en Matemáticas Aplicadas en la Universidad Autónoma de Coahuila, realizó sus estudios de maestría y doctorado en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Cuenta con la participación en congresos nacionales e internacionales, es autor y coautor de capítulos de libro de carácter científico y de artículos arbitrados e indexados, y ha dirigido tesis de nivel licenciatura y maestría.