

Propiedades de pastas de cementos modificados con residuos industriales

Rodrigo Puente Ornelas^A, Leonardo Chávez Guerrero^A, Gerardo Fajardo San Miguel^B, Alejandro Trujillo Álvarez^A, Herlinda María Delgadillo Guerra^A

^A Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME-CIDET

^B Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, ropuor@gmail.com

RESUMEN

Pastas fueron elaboradas reemplazando cemento portland ordinario por caliza de bagazo de agave, ceniza volante, nano-SiO₂ geotérmica y humo de sílice. Las pastas fueron curadas a 20°C y 100% de humedad hasta 28 días. Se les evaluó la resistencia a la compresión, resistencia a la penetración de iones cloruro, porosidad y microestructura. Tras la evaluación, los resultados revelaron que las pastas reemplazadas mostraron una matriz más compacta y menos porosa, valores de resistencia a la compresión de hasta un 45% más, valores de paso de carga de hasta 57% menos, en comparación con las pastas de referencia.

PALABRAS CLAVE

Ion cloruro, cemento, caliza, nano- SiO₂, microestructura.

ABSTRACT

Pastes were fabricated replacing ordinary portland cement by limestone agave bagasse, fly ash, geothermal nano-SiO₂ and silica fume. The pastes were cured at 20°C and 100% humidity for 28 days. They evaluated the compressive strength, resistance to penetration of chloride ions, porosity and microstructure. After evaluation, the results showed that the pastes additioned exhibited a more compact and less porous matrix, values of compression strength of up to 45% more, load passage values of up to 57% less, compared to reference pastes.

KEYWORDS

Chloride ion, cement, limestone, nano-SiO₂, microstructure.

INTRODUCCIÓN

Los problemas actuales causados por las altas emisiones de CO₂, como el calentamiento global y el aumento de la generación de residuos industriales, han creado conciencia en la sociedad acerca de la preservación del medio ambiente. Por otra parte, la sostenibilidad de la industria del cemento se ha visto amenazada por el aumento del precio de los combustibles fósiles y los eco-impuestos para la liberación de CO₂.

Por lo anterior, la mitigación de las emisiones de CO₂ mediante el uso de adiciones minerales como sustitutos parciales de cemento es hoy en día una práctica muy común,¹⁻³ no sólo para preservar el medio ambiente, la energía y

los recursos naturales, sino también para mejorar la calidad, propiedades (física, química, mecánica), durabilidad y precio del concreto.^{4,5}

Hay muchas investigaciones en las que se han utilizado adiciones minerales tales como puzolanas naturales, *filler* calizo, desechos industriales (escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice y cenizas de cascara de arroz), agregado grueso de concreto reciclado, para nombrar unos pocos.⁶⁻¹⁰ En varios casos, estas adiciones aumentan la resistencia mecánica; mejoran la uniformidad microestructural fomentando con ello la reducción en la permeabilidad y porosidad.

A pesar de los numerosos informes relacionados con el uso de adiciones minerales en las últimas cinco décadas, los cuales proponen la viabilidad de sustituir un porcentaje determinado de cemento sin perjudicar las propiedades del concreto, existen muy pocos en los cuales se aborde sobre el uso de los residuos industriales generados por las plantas geotérmicas y la industria del mezcal o tequila. En el caso de los residuos generados por las plantas de energía geotérmica, estos pueden llegar a causar problemas importantes debido a su generación y acumulación. Varias estimaciones indican que más del 80% de las plantas existentes tienen estas dificultades.¹¹ Sin embargo, en la actualidad la producción de electricidad a través de los recursos geotérmicos es cada vez mayor por las ventajas económicas y ecológicas en comparación con otras fuentes de generación de electricidad.¹²

Una de estas plantas se encuentra en Mexicali, Baja California, México, en la cual se estima una producción de hasta 70 mil toneladas por año¹³ de residuos (residuo llamado en este artículo como nano- SiO_2 geotérmica, “NSG”), por lo que es importante encontrar una aplicación para este residuo. Este residuo es un material compuesto por nanopartículas de sílice amorfa (~ 20nm) en más de 90% en peso y una cantidad considerable de cloruros de sodio y potasio.¹⁴ Este material ha sido estudiado como material secundario en la producción de vidrio, cerámica refractaria,¹⁵ así como en la preparación de pastas, morteros y concretos.¹⁶⁻¹⁸

Por otra parte, el mezcal o tequila, que es una bebida alcohólica producida en México, requiere como materia prima para su fabricación, plantas de

agave, cuyo consumo ha aumentado año con año y es estimado actualmente en 1.000.000 de toneladas.¹⁹ Según Ibarra-Hernández y cols.,²⁰ la composición global de la planta agave es: 60% humedad, 25% carbohidratos, 10% fibra, 2,5% minerales y 2,5% de otros componentes, tales como proteínas e inulinas, por lo tanto, durante el proceso de fabricación de mezcal o tequila se producen miles de toneladas de residuos que comúnmente son llamados “bagazo”, que tan solo la industria de producción del mezcal genera de 15 a 20 kg por litro.²¹ Si estos residuos no se reciclan o se procesan adecuadamente generan contaminación y suelen ser quemados o arrojados a los vertederos.

Según diversos estudios, el bagazo es un candidato para su uso en la preparación de alimento para ganado, remedios para la salud, construcción, fertilizantes, combustible, sustratos para la aplicación de enzimas inulinosas de microorganismos como *Aspergillus niger* CH-A-2010 y CH-A-2016.²²⁻²⁷ Sin embargo, hay pocos estudios sobre la viabilidad de su uso en la industria de la construcción.²⁸⁻²⁹ Por esta razón, en la presente investigación se estudiaron los efectos de la sustitución parcial de cemento portland ordinario por caliza de bagazo de agave, ceniza volante y nano- SiO_2 geotérmica, sobre la porosidad, resistencia mecánica, microestructura y resistencia a la penetración de iones cloruro en pastas elaboradas con estos materiales.

EXPERIMENTACIÓN

Materias primas

El bagazo de agave se recogió directamente de la fábrica de mezcal IPIÑA SA de CV ubicada en San Luis Potosí, México. Se utilizó un horno Thermolyne 48000 para calentar el bagazo a 450 °C con el fin de obtener las cenizas, llamadas en este artículo como caliza de bagazo de agave (CBA) debido a su alta concentración de CaCO_3 . La ceniza se tamizó para obtener partículas menores a 75 micras y finalmente fue homogenizada. Por otro lado, la cenizas volante (CV) fue proporcionada por la planta Termoeléctrica José López Portillo (ubicado en Nava, Coahuila, México), la cual corresponde a ceniza de clase F, debido a su bajo contenido de CaO, de acuerdo a lo descrito por ASTM C618-08a.³⁰ La ceniza fue tamizada para obtener partículas menores a 75 micras y finalmente fue homogenizada.

Respecto a la nano- SiO_2 geotérmica (NSG), esta fue proporcionada por la planta geotérmica Cerro Prieto (que se encuentra en Mexicali, Baja California, al norte de México). Este material fue lavado utilizando agua que se encontraba a 100°C , esto con la finalidad de disolver y eliminar la alta concentración de cloruros de sodio y potasio (~32,2%) contenidos en la nano- SiO_2 , de manera que se el NSG quede en una concentración de cloruros totales igual a 0% en peso.

El % de cloruros totales (Cl⁻) fue determinado mediante la técnica de valoración volumétrica utilizando el método de Mohr.³¹ Después del lavado, la NSG se filtró y se secó durante 24 horas a 120°C en un horno eléctrico. Posteriormente, la NSG se tamizó para obtener partículas menores a 75 micras y finalmente fue homogenizada.

El humo de sílice (HS) empleado en este trabajo corresponde a una micro-sílice densificada en polvo comercial, marca RHEOMAC SF100, la cual es comercializada por la compañía química BASF. Dicho material fue tamizado para obtener partículas menores a 75 micras y finalmente fue homogenizado.

El cemento utilizado en este estudio fue proporcionado por CEMEX México y corresponde a la clasificación de tipo I CPO (Cemento Portland Ordinario, de acuerdo a la norma mexicana, NMX-C-414-ONNCCE).³² Todas las materias primas utilizadas en este estudio se caracterizaron por fluorescencia de rayos X y las composiciones químicas se muestran en la tabla I.

Diseño de mezclas y producción de pastas

Se elaboraron pastas cilíndricas de diferentes tipos de mezclas utilizando cemento portland ordinario (CPO), caliza de bagazo de agave (CBA), ceniza volante (CV) y nano- SiO_2 geotérmica (NSG), humo de sílice (HS), agua destilada y superplastificante comercial (Glenium 3150, base policarboxilato en una proporción de 1.5% con respecto al peso del cemento). Las dimensión de las pastas cilíndricas fue de 25.4x50.5mm y se elaboraron usando una relación agua/materiales cementantes (a/c) de 0.45, así como la sustitución de CPO por 1.67, 2.5 y 5% en peso de CBA, CV, NSG y SF).

Tabla I Análisis químico por FRX de las materias primas empleadas.

Composición química (% peso)					
Compuesto	CPO	NSG	CV	CBA	HS
Na ₂ O	0.36	0.32	0.273	-	0.17
MgO	1.27	-	0.845	15.79	0.42
Al ₂ O ₃	4.46	0.09	25.144	-	0.42
SiO ₂	18.51	98.36	61.165	1.4	95.89
P ₂ O ₅	0.08	-		3.53	0.06
SO ₃	3.26	0.03	0.184	0.82	0.45
Cl ⁻	-	0.06			
K ₂ O	0.87	0.23	1.405	12.75	0.41
CaO	67.45	0.45	2.42	65.31	0.61
TiO ₂	0.21	-	0.988	-	-
Mn ₂ O ₃	0.13	0.05	0.014	-	0.03
Fe ₂ O ₃	2.61	0.04	4.556	0.189	1.22
*P. I., %	0.79	0.31	3.016	0.21	0.29
**R. I., %	-	0.05	-	-	0.03
Total	100	100	100	100	100

- : No aplica
 * P. I.: Pérdidas por ignición a 950°C .
 **R. I.: Residuos insolubles.

La dosificación de las materias primas utilizadas se muestra en la tabla II. Las pastas fueron fraguadas a 20°C . Después de 24 horas, se fueron sumergidas en agua saturada con hidróxido de calcio, permaneciendo en ese ambiente de curado hasta 28 días a una temperatura de 20°C . Para obtener la mejor reproducibilidad de los experimentos, se utilizaron cuatro pastas por cada tipo de mezclas y por cada período de hidratación.

Métodos de medición

La resistencia a la compresión se evaluó a los 28 días utilizando una máquina de compresión de 200 toneladas, esto para cada una de las edades de curado. Después de las pruebas de resistencia a compresión, el centro de las pastas se extrajo y se trituró para obtener partículas de aproximadamente 5 mm de diámetro las cuales fueron sumergidas en recipientes que contenían acetona, y se sometieron a un proceso de secado empleando una temperatura de 50°C por 24 h, esto para detener las reacciones de hidratación.

Tabla II. Proporción de materiales en la elaboración de los diferentes tipos de mezclas (% en peso).

	Materiales cementantes suplementarios (Nivel de reemplazo de CPO en % en peso)						SP	Total
	CPO	CBA	CV	NSG	HS	Agua		
R	68.259 (100%)					30.717	1.024	100
M1	64.846 (95%)	3.413 (5%)				30.717	1.024	100
M2	64.846 (95%)		3.413 (5%)			30.717	1.024	100
M3	64.846 (95%)			3.413 (5%)		30.717	1.024	100
M4	64.846 (95%)				3.413 (5%)			
M5	64.846 (95%)	1.706 (2.5%)	1.706 (2.5%)			30.717	1.024	100
M6	64.846 (95%)	1.137 (1.67%)	1.137 (1.67%)	1.137 (1.67%)		30.717	1.024	100

Para el análisis de pastas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), las muestras representativas se impregnaron con resina epoxi, fueron devastadas y pulidas y finalmente recubiertas con grafito. Las imágenes de MEB se obtuvieron en el modo de electrones retrodispersados utilizando un voltaje de aceleración de 20 kV, las observaciones más relevantes se presentan en este trabajo. Además, se tomaron algunas secciones de las pastas para determinarles la porosidad siguiendo el procedimiento reportado en la ASTM C-642-97.³³

La resistencia a la penetración de iones cloruro se evaluó en pastas cilíndricas curadas a 28 días empleando la técnica RCPT (rapid chloride penetration test) de acuerdo con el procedimiento estipulado por la norma ASTM C 1 202.³⁴ Para eso, las pastas de las dimensiones 25.4x50.5mm fueron cubiertas con pintura epoxi en toda su superficie periférica y después de secarse por 24 horas, se introdujeron en una cámara de secado a una presión de vacío de 1 mm Hg durante tres horas; posteriormente, la cámara se llenó con agua destilada manteniendo la presión de vacío durante 1 hora; después, las pastas se mantuvieron en la inmersión de agua por 24 horas, esto sin presión de la cámara. Después del período de inmersión, las pastas se colocaron entre dos celdas conectadas a un potencióstato. Para ello, una de las celdas se llenó con solución acuosa preparada al 0.3 N de NaOH y la otra celda con una solución acuosa preparada al 3% de NaCl.

Finalmente, las células fueron conectadas a una fuente de alimentación de voltaje, donde el electrodo

de la celda que contenía el NaCl funcionó como cátodo y el electrodo de la celda que contenía NaOH funcionó como ánodo. La prueba de RCPT se realizó en 3 pastas por cada diseño de mezcla utilizando un voltaje constante de $60,0 \pm 0,1$ V durante seis horas, obteniendo como resultado de la prueba de un valor de paso de carga total (Q en culombios). Los resultados observados en los valores de Q son el promedio de 3 ensayos y fueron clasificados de acuerdo con los criterios sugeridos por la norma ASTM C-1202 (ver tabla III).

Tabla III. Penetrabilidad del ion cloruro en base al paso de carga.

Paso de carga (coulombs)	Penetrabilidad del ion cloruro
>4,000	Alta
2,000-4000	Moderada
1,000-2,000	baja
100-1,000	Muy baja
<100	Despreciable

Después de la prueba de RCPT, las pastas se rompieron transversalmente y una de las secciones fue expuesta en su cara interna ante una solución acuosa preparada al 0.1 M con nitrato de plata (AgNO_3 , el cual funge como indicador de iones cloruro). Después de 5 minutos de exposición, la precipitación de cloruro de plata color blanco (AgCl) apareció sobre la superficie revelando la presencia de iones cloruro en el interior de las pastas. Posteriormente, la profundidad de penetración de iones cloruro fue evaluada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas en las pastas. De manera general, en dicha figura puede observarse que los diferentes tipos de mezclas presentaron un incremento en la resistencia a la compresión con respecto al incremento en el tiempo de curado, esto debido a la producción de gel CSH, principal promotor de la resistencia mecánica, el cual es producto de reacción del agua con las diferentes fases anhidras del cemento. Así mismo, los materiales suplementarios como el CV, HS y NSG también fomentaron un incremento en las propiedades mecánicas de las pastas que fueron adicionadas con éstos, ya que dichos materiales reaccionaron con el hidróxido de calcio (producto de hidratación generado tras la reacción del agua con las diferentes fases anhidras del cemento) produciendo gel CSH adicional, de manera que a los 28 días de curado, los valores de resistencia a la compresión de las pastas adicionadas superaron a los valores de las pastas elaboradas con 100% de CPO.

A 28 días, las pastas adicionadas con NSG superaron a las pastas elaboradas con 100% de CPO (mezcla R) en un 21.27%, 35.08% y 43.07% más en resistencia a la compresión al reemplazar el CPO por NSG en un 1.67% (mezcla M6), 2.5% (mezcla M5) y 5% (mezcla M3) respectivamente. Estos resultados son atribuidos a la efectividad de la reacción puzolánica de la NSG con el hidróxido de calcio, de manera que al tener mayor NSG en la matriz cementante existe mayor posibilidad de que ésta produzca más gel CSH y consecuentemente la matriz se haga más compacta mejorando con ello los valores de resistencia a la compresión. En otras investigaciones, se ha observado una alta actividad puzolánica en nano-sílice geotérmica cuando esta ha sido utilizada como material de reemplazo de cemento.^{35,36} Además, es importante señalar que de acuerdo con estudios realizados por Quercia,³⁷ quien a su vez refiere a Qing³⁸ y Lin³⁹ las partículas de nano-sílice empleadas en la elaboración de morteros y concretos actúan como sitios de nucleación para la precipitación de gel CSH, logrando con ello un mejoramiento en los resultados de resistencia a la compresión, efecto también observado con el uso de la NSG.

Por otro lado, puede observarse que la resistencia

a la compresión de las pastas elaboradas con 5% de CV (mezcla M2) va incrementando paulatinamente con respecto al tiempo, sin embargo, su resistencia a 28 días es 13.52% menor que la exhibida por las pastas de referencia (mezcla R). Este fenómeno fue observado en otras investigaciones donde las pastas elaboradas con CPO fueron adicionadas con partículas finas y esféricas de CV mostrando un incremento en su resistencia mecánica a edades tardías, efecto que fue atribuido al empaquetamiento fomentado por las partículas pequeñas y esféricas de la ceniza volante fina de modo que su reacción se vio retardada a edades tempranas;⁴⁰⁻⁴³ además, otros autores manifestaron en sus investigaciones que el tamaño y la morfología esférica, la composición química y la fracción amorfa de la CV, modifican el desarrollo de las propiedades mecánicas, químicas y microestructurales de pastas, morteros y concretos.⁴⁴ Bajo este esquema, tomando en consideración lo observado en dichas investigaciones, se esperaría que las pastas adicionadas con CV (mezcla M2) superen en resistencia a la compresión a las pastas R a edades tardías.

Así mismo, en la figura 1 se aprecia que las pastas elaboradas con 5% de HS (mezcla M4) mostraron mayor resistencia a la compresión con respecto a las pastas R a la edad de 28 días, lo que representa un 7.5% más; ello se debe a que el HS es un material no cristalino que presenta alta área superficial, lo cual lo hace ser un excelente material puzolánico. Es sabido que este material durante las reacciones iniciales de del cemento, actúa como sitio de nucleación incrementado con ello la velocidad de reacción y precipitación de CSH adicional promoviendo el incremento en la resistencia a la compresión. Este comportamiento ha sido reportado en diversas investigaciones en las cuales concretos adicionados con el HS han exhibido valores superiores en la resistencia a la compresión con respecto a los concretos elaborados con 100% de CPO.^{45,46}

Por otro lado, las pastas adicionadas con CBA mostraron un incremento en la resistencia a la compresión con respecto al tiempo y al igual que el resto de las pastas, también mostraron valores de resistencia mecánica mayores que las pastas R, tal es el caso de las pastas adicionadas al 5% con CBA (mezcla M1), las cuales superaron en resistencia a la compresión en un 13.95% más, respecto a

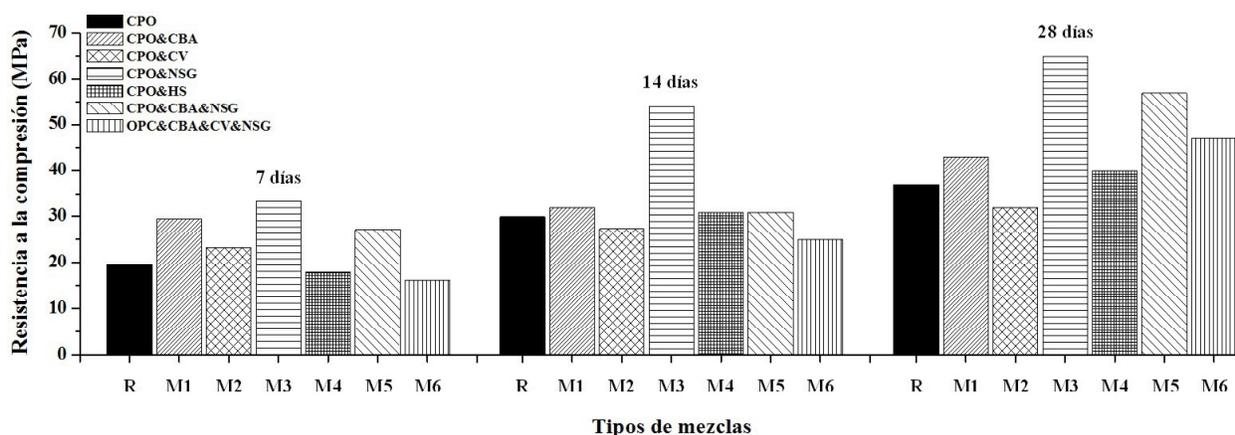


Fig. 1. Resultados de resistencia a la compresión de pastas curadas a 7, 1 y 28 días.

las pastas de referencia R. Esto se debe a que el *filler* calizo ayuda en el proceso de aceleración de la hidratación del cemento, obteniendo efectos benéficos en la resistencia mecánica tal y como lo manifiesta Lothenbach y cols.⁴⁷ y más tarde De Weerd y cols.,⁴⁸ además; Li y cols.⁴⁹ observaron un incremento sustancial en la resistencia mecánica de concretos cuando adicionaban el 3% de nano caliza (*nano-limestone*) obteniendo 140 MPa de resistencia a la compresión comparada contra la exhibida en los concretos de referencia que fue de 125.6 MPa, lo que representa una ganancia en resistencia a la compresión del ~12%. Así mismo, Ramezaniyapour y cols.,⁵⁰ observaron que a la edad de 28 días, la resistencia mecánica de concretos adicionados con 5% de caliza (*limestone*) superaba a la exhibida en los concretos elaborados con 100% de CPO, este comportamiento se repetía a la edad de 90 y 180 días de curado.

En la figura 2, son presentados los resultados obtenidos de las prueba de penetración rápida del ion cloruro, esto tomando en consideración los valores de paso de carga recomendados por la norma ASTM C1202. De manera general, en dicha figura puede observarse que todas las mezclas presentaron una resistencia a la penetración del ion Cl⁻ considerada como “muy baja” de acuerdo parámetros estipulados por la norma ASTM C1202, ya que todos los valores de carga se encuentran en el rango de 100-1000 coulombs. Sin embargo, las mezclas exhibieron diferencias en sus valores de carga, tal es el caso de las pastas adicionadas con 5% de NSG (mezcla 3) que presentaron cargas del orden de los 309

Coulombs, siendo las que mayor resistencia al paso del ion Cl⁻ exhibieron. Este valor de carga representa una penetración de 8.52 mm de acuerdo a estudios post-mortem realizados en las pastas (ver tabla IV). Lo anterior indica que el uso de la NSG promueve en las pastas una fuerte capacidad para inhibir la penetración de los iones Cl⁻, esto haciendo una comparación con los valores de carga exhibidos en las pastas elaboradas con 100% de CPO los cuales fueron 720 Coulombs (14.32 mm de penetración del ion Cl⁻). De acuerdo a estos los valores de carga, las pastas adicionadas con NSG exhibieron un 57.08% menos de paso de carga respecto a las pastas elaboradas con 100% de CPO.

Comportamiento similar fue observado en las mezclas M2 (5% CV, 610 Coulombs, 12.92 mm de penetración del ion Cl⁻), M4 (5% HS, 470 Coulombs,

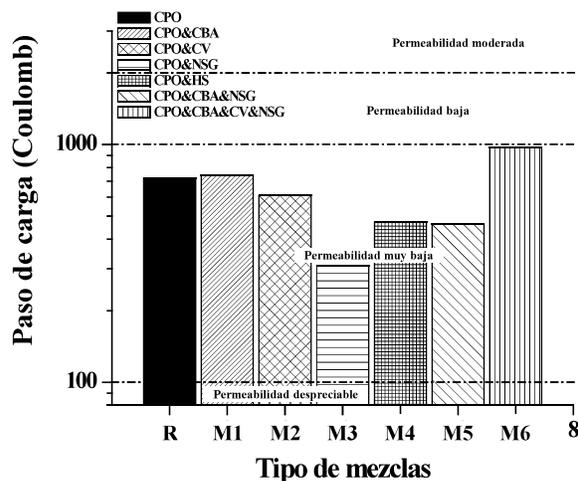


Fig. 2. Resistencia a la penetración del ion Cl⁻ en pastas curadas a 28 días.

11.72 mm de penetración del ion Cl⁻) y M5 (2.5% CBA y 2.5% NSG, 463 Coulombs, 10.77 mm de penetración del ion Cl⁻) ya que estas presentaron valores de carga un poco menores respecto a los obtenidos en las mezclas R (100% OPC), dichos valores representan un 15.27%, 34.72% y 35.69% menos de paso de carga respectivamente.

Este mismo comportamiento se ha observado en otras investigaciones en las que se ha utilizado nanosilice como material suplementario en la elaboración de morteros, los cuales exhibieron un enorme decremento en la penetración del ion Cl⁻ respecto a los morteros de referencia.^{51,52} Así mismo, se ha reportado que la penetración del ion cloruro en los concretos usualmente disminuye con la adición de materiales suplementarios como la ceniza volante y el humo de sílice.^{53,54}

Tabla IV. Resultados de porosidad total y penetración de cloruros en pastas curadas a 28 días.

	Porosidad Total (%)	Penetración de Cl ⁻ (mm)
R	16.98	14.32
M 1	17.17	14.58
M 2	16.33	12.92
M 3	13.76	8.52
M 4	14.66	11.72
M 5	14.33	10.77
M 6	18.27	18.31

Por otro lado, las mezclas M1 (5% CBA, 740 Coulombs, 14.58 de penetración del ion Cl⁻) y M6 (1.67% CBA & 1.67% CV & 1.67% NSG, 971 Coulombs, 18.31 mm de penetración del ion Cl⁻) presentaron un ligero incremento en los valores de carga respecto a la mezcla de referencia, dicho incremento representa un 2.7% y 25.84% respectivamente. Algunos autores han reportado que la penetración del ion cloruro en concretos incrementaba con el contenido de caliza (10%, 15% y 20% de *limestone*).^{55,56}

La figura 3 muestra una comparativa respecto a la microestructura exhibida por cada una de las pastas a la edad de 28 días y que fue adquirida por mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) utilizando el detector de electrones retrodispersados y magnificaciones de 500X. En

dicha figura los materiales de reemplazo de CPO son identificados de la siguiente manera: CBA (flecha color rosa), CV (flecha color naranja), NSG (flecha color roja), HS (flecha color azul); además, el gel CSH en la modalidad de productos internos (PI, flecha color negro con amarillo) y productos externos (PE, flecha color blanco con negro), granos de cemento en proceso de hidratación (A, flecha color negro) y la porosidad (P, flecha color café). De manera general, se puede observar que la pasta R (100% OPC) presenta gran cantidad de granos de cemento en proceso de hidratación (A), así como gran cantidad de poros (P), esto en comparación con el resto de las pastas. Similar comportamiento se aprecia en las mezclas M1 (5% CBA) y M6 (1.67% CBA & 1.67% CV & 1.67% NSG), pese a que esta última fue adicionada con materiales puzolánicos como el FA y la NSG

Estas pastas R, M1 y M6 exhibieron los valores más altos en porosidad, 16.98%, 17.17% y 17.65% respectivamente (ver tabla IV), valores que concuerdan con los resultados obtenidos de resistencia a la penetración de ion cloruro (paso de carga) y el estudio post-mortem de las pastas cuando estas se pusieron en interacción química con el nitrato de plata utilizado como indicador de penetración del ion cloruro. Este ligero incremento de porosidad obtenido en las pastas M1 respecto a las pastas R puede atribuirse a que las partículas de CBA poseen morfologías rectangulares fibrosas del orden de 20 y 40 μm las cuales presentan porosidad a su interior, así como poros a su alrededor (interface entre las partículas de CBA y los productos de hidratación), tal como se puede observar en las imágenes de la figura 3 donde CBA es señalada mediante flechas color rosa.

Este fenómeno ha sido previamente reportado en otras investigaciones en las cuales, pastas fueron adicionadas con caliza y analizadas microestructuralmente a la edad de 7 y 28 días.^{57,58} Similar comportamiento se sugiere que fue propiciado en las pastas M6 ya que tienen como material de adición el CBA, sin embargo, el efecto de las reacciones puzolánicas provenientes de los otros materiales de adición (CV y la NSG) con el hidróxido de calcio no fue el esperado ya que estos contribuyeron a la poca formación de gel CSH adicional para densificar la matriz cementante, de

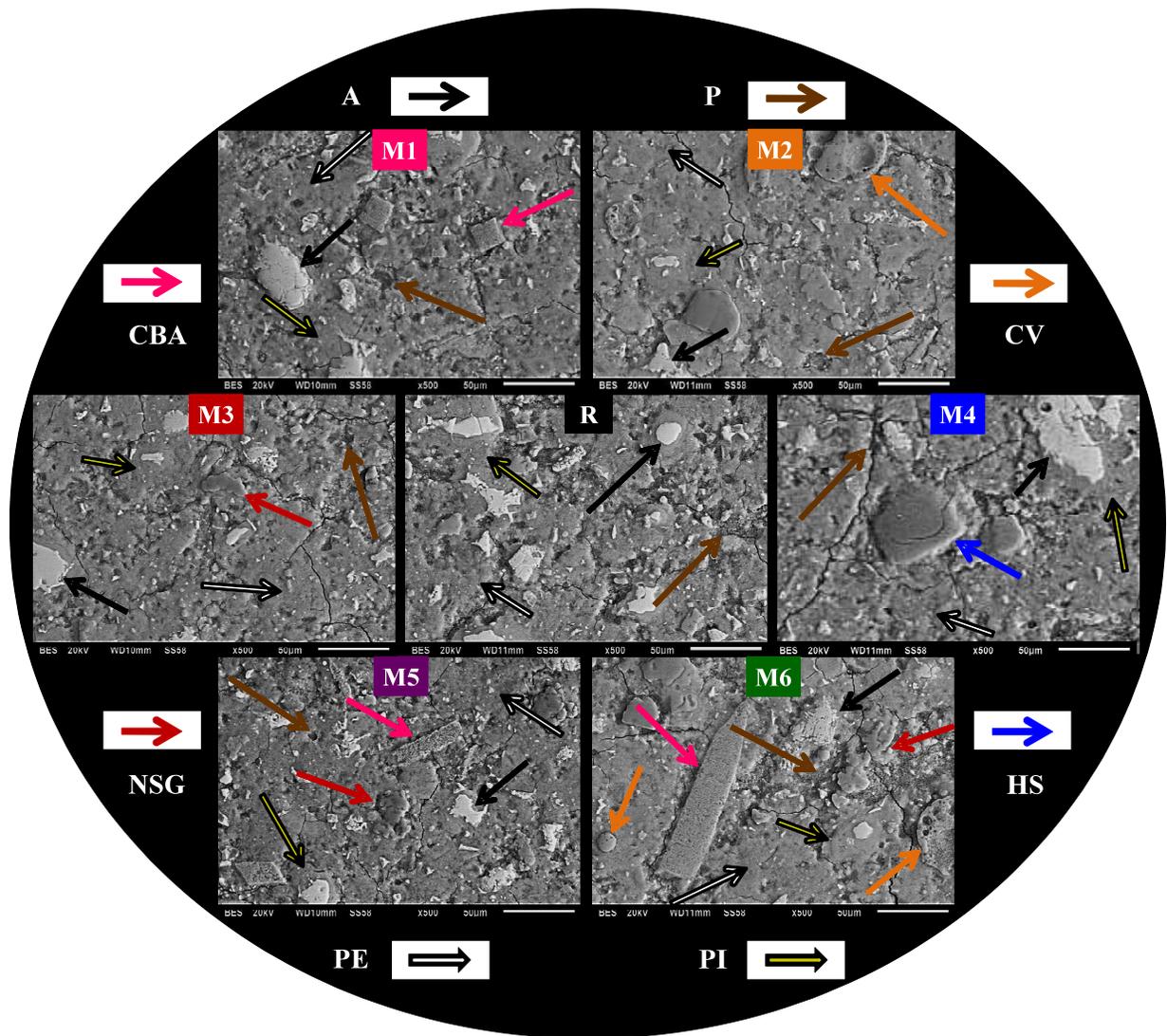


Fig. 3. Comparación microestructural entre todas las pastas curadas a 28 días: CBA (flecha rosa), CV (flecha naranja), NSG (flecha roja) y HS (flecha azul); productos internos de gel CSH (PI, flecha negra con amarillo, productos externos de gel CSH (PE, flecha blanco con negro), cemento anhidro (A, flecha negra) y porosidad (P, flecha café).

manera que la disminución de la porosidad no fue favorecida como se esperaba.

Por otro lado, las pastas adicionadas con NSG al 2.5% y 5% en peso, presentaron microestructuras más compactas debido a la fuerte reacción puzolánica entre la NSG y el hidróxido de calcio que fomenta gran cantidad de gel CSH adicional contribuyendo a la disminución de la porosidad, tal y como lo reflejan los resultados en los que las pastas M3 y M5 presentan los valores más bajos de porosidad, 13.76% y 14.33% respectivamente (ver tabla IV). Este efecto de densificación en la microestructura de

las pastas con el uso de nano-sílice ha sido reportado por Du y colaboradores.^{59,60}

Finalmente, las pastas adicionadas con HS al 5% (M4) presentaron una microestructura no tan compacta como la que se esperaba, de manera que la porosidad que desarrollaron (14.66%) fue mayor a la presentada por las pastas adicionadas con NSG. Además, la microestructura reveló muchos aglomeramientos de partículas de HS que sobrepasaron las 50 µm, propiciando con ello el desarrollo de la reacción álcali sílice (RAS), fenómeno que contribuyó en los resultados obtenidos

en las propiedades mecánicas, los cuales presentaron poca ganancia en los valores de resistencia a la compresión con respecto los exhibidos en las pastas de referencia R, ya que existió poca reactividad en el HS para la generación adicional de gel CSH. Este fenómeno de RAS ha sido ampliamente reportado por otros autores, el cual contribuye de manera muy negativa en las propiedades en general de los concretos.^{61,62}

CONCLUSIONES

Los resultados revelaron que la nano- SiO_2 geotérmica (NSG) y la caliza de bagazo de agave (CBA) podrían ser materiales potencialmente adecuados en la fabricación de pastas, morteros y concretos con aplicaciones industriales, lo que contribuiría positivamente a la reducción de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, así como en la disminución del impacto ambiental generado en las zonas de eliminación. Esto debido a que ambos fomentaron en las pastas adicionadas con estos, un mejoramiento en las propiedades mecánicas y una menor porosidad, permeabilidad de iones cloruro y alta resistencia al paso de carga, en comparación con pastas elaboradas con 100% de CPO y así como las adicionadas con humo de sílice (HS) y ceniza volante (CV).

Los resultados de las propiedades mecánicas mostraron que es viable la sustitución de CPO por nano- SiO_2 geotérmica (NSG) hasta un 5%, ya que la adición de este material superó el valor de la resistencia a la compresión en ~45% más, respecto al exhibido por las pastas elaboradas con 100% de CPO y en ~40% más respecto a las pastas adicionadas con HS al 5%. Así mismo, es viable la utilización de la caliza de bagazo de agave (CBA) hasta 5%, ya que la adición de este material superó el valor de la resistencia a la compresión en ~15% más respecto al exhibido por las pastas elaboradas con 100% de CPO. Además, los sistemas ternario (CPO&CBA&NSG) y cuaternario (CPO&CBA&CV&NSG) exhibieron un 20% y 35% más de resistencia a la compresión respecto a las pastas hechas con 100% de CPO respectivamente.

Los resultados de la RCPT indican que las pastas adicionadas con NSG tienen una estructura menos porosa con respecto a la exhibida en las pastas de

referencia. En este sentido, la adición de NSG en 5% (mezcla M3 CPO&NSG) y en 2.5% (mezcla M5 CPO&CBA&NSG) propició un menor paso de carga a través de las pastas en ~57% y ~35%, respectivamente, esto comparado con lo exhibido en las pastas de referencia. Comportamiento similar se presentó en pastas elaboradas con HS y CV cuyos valores en el paso de carga fueron de ~35% y ~15% menores a los presentados en las pastas elaboradas con 100% de CPO respectivamente. Sin embargo, este comportamiento no se observó en las pastas adicionadas con CBA ya que estas exhibieron en el paso de carga un 3% (mezcla 1 OPC&ABA) y 25% (mezcla M6 CPO&CBA&CV&NSG) más respecto a las pastas hechas con 100% de CPO.

El análisis microestructural mostró que las pastas elaboradas con NSG exhibieron una mayor densificación debido a la fuerte reacción puzolánica del NSG con el hidróxido de calcio generando gel CSH adicional, logrando con ello una matriz densificada la cual exhibió menos porosidad en comparación con la presentada en las pastas elaboradas con 100% de CPO. Similar comportamiento manifestaron las pastas adicionadas con HS y CV, sin embargo, la reacción puzolánica fue pobre en comparación con la generada por la NSG, por lo tanto, dichas pastas exhibieron pequeños incrementos en los valores de porosidad respecto a los presentados por las pastas adicionadas con NSG, pero estos valores fueron menores en comparación con las pastas elaboradas con 100% de CPO. Este comportamiento no fue observado en las pastas adicionadas con CBA, debido a la porosidad desarrollada alrededor de las partículas de CBA, exhibiendo con ello microestructuras menos compactas y más porosas que los presentados en pastas de elaboradas con 100% de CPO.

REFERENCIAS

1. E. M. R. Fairbairn, B. B. Americano, G. C. Cordeiro, T. P. Paula, R. D. Toledo Filho, M. M. Silvano, J. Environ. Manage, 91 (2010) 1864-1871.
2. C. A. Hendriks, E. Worrell, D. De Jager, K. Blok, P. Riemer, Greenhouse gas control technologies conference paper-cement, (2004)1-11.
3. M. Nehdi, J. Duquette, A. El Damatty, Cem. Concr. Res., 33 (2003) 1203-1210.

4. D. Anderson, A. Roy, R. K. Seals, F. K. Cartledge, H. Akhter, S. C. Jone, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 437-445.
5. V. M. Malhotra, *Proceedings of a Symposium Honoring Prof Raymundo Riverá-Villarreal International Symposium on Durability of Concrete*, Monterrey México, May (2005).
6. A. Cwirzen, V. Penttala, C. Vornanen, *Cem. Concr. Res.*, 38 (2008) 1217-1226.
7. K. Sisomphon, L. Franke, *Cem. Concr. Res.*, 37 (2007) 1647-1653.
8. R. Corral-Higuera, S. P. Arredondo-Rea, M. A. Neri-Flores, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, J. H. Castorena-González, A. Martínez-Villafañe, F. Almeraya-Calderón, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 958-970.
9. E. I. Moreno, R. G. Solís-Carcaño, J. Varela-Rivera, J. C. Pacho-Monforte, R. A. Cua-Cuevas, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 10 (2015) 6444-6453.
10. M. J. Pellegrini-Cervantes, C. P. Barrios-Durstewitz, R. E. Nuñez-Jaquez, S. P. Arredondo-Rea, F. J. Baldenebro-Lopez, M. Rodríguez-Rodríguez, L. G. Ceballos-Mendivil, A. Castro-Beltrán, G. Fajardo-San-Miguel, F. Almeraya-Calderon, A. Martinez-Villafañe, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 10 (2015) 332-346.
11. O. D. Whitespace, J. T. Kwan, K. M. Chan, D. P. Hoyer, Patent: "Process for using sludge from geothermal brine to make concrete and concrete composition", United States Patent 4900360, California, (1990).
12. A. Camenzuli, G. M. Mudd, 3rd International Conference on Sustainability Engineering & Science: Blueprints for Sustainable Infrastructure Auckland, New Zealand, December (2008).
13. Comisión Federal de Electricidad, <http://www.cfe.gob.mx>.
14. L. Y. Gómez, J. I. Escalante, G. Mendoza, *Journal of Materials Science Letters*, 39 (2004) 4021-4025.
15. J. Rincon, M. Romero, C. Díaz, V. Balek, Z. Malek, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 56 (1999) 1261-1269.
16. L. Y. Gómez, J. I. Escalante, 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Canada, (2007).
17. R. Puente-Ornelas, L. Y. Gómez-Zamorano, M. C. Alonso, P. C. Zambrano, A. M. Guzmán, E. Rodríguez, B. Bermúdez-Reyes, M. Sánchez-Moreno, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 136-149.
18. C. A. Iñiguez-Sanchez, L. Y. Gómez-Zamorano, M. C. Alonso, *J. Mater. Sci.*, 47 (2012) 3639-3647.
19. C. G. Iñiguez, C. J. J. Bernal, M. W. Ramírez, N. J. Villalvazo, *Advances in Chemical Engineering and Science*, 4 (2014) 135-14.
20. E. B. Ibarra-Hernández, J. F. Botero Gonzalez, C. Cortez Amador, *Ingeniería de tequila 1a Edición*, Bogota, Colombia (2010) 12-37.
21. L. Chávez, *Ingenierías*, 8 (2010) 8-16.
22. B. E. Barragán-Huerta, Y. A. Téllez Díaz, A. Laguna Trinidad, *Revista Sistemas Ambientales*, 2 (2008) 44-50.
23. A. M. Sánchez-Riano, A. I. Gutiérrez -Morales, J. A. Muñoz-Hernández, C. A. Rivera-Barrero, *Tombaga*, 5 (2010) 61-91.
24. L. Chávez-Guerrero, M. Hinojosa, *Fuel*, 89 (2010) 4049-4052.
25. L. Chávez-Guerrero, J. Flores, B. I. Kharissov, *Chemosphere*, 81 (2010) 633-638
26. E. Esparza-Ibarra, L. Romero-Bautista, F. Cabral-Arellano, R. Bañuelos-Valenzuela, *RelbCi*, 1 (2014) 103-110.
27. C. Huitron, R. Perez, A. E. Sanchez, P. Lappe, L. Rocha Zavaleta, *Journal of Environmental Biology*, 29 (2008) 37-41.
28. R. Puente Ornelas, L. Chávez Guerrero, P. Zambrano Robledo, M. Lara Banda, 12th Interamerican Microscopy Congress CIASEM 2013, Cartagena de Indias - Colombia, Septiembre (2013).
29. J. R. González-López, J. F. Ramos-Lara, A. Zaldivar-Caden, L. Chávez-Guerrero, R. X. Magallanes-Rivera, O. Burciaga-Díaz, *Fuel Processing Technology*, 133 (2015) 35-42.
30. ASTM C618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, (2008).
31. D. Skoog, D. West, F. Holler, *Química Analítica*, 6 Ed. Mc Graw-Hill, México, (1995).

32. NMX C-414-ONNCCE: Industria de la construcción, cementos hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (2003).
33. ASTM C-642-97: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, (1997).
34. ASTM C1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, (2010).
35. L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, W. L. Repette, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 2487.
36. J. Shih, T. Chang, T. Hsiao, *Materials Science and Engineering A*, 424, 1-2 (2006) 266-274.
37. G. Quercia, H. J. H. Brouwers, 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark, (2010) 20 – 23.
38. Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, Ch. Rongshen, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 539–545.
39. K. L. Lin, W. C. Chang, D. F. Lin, H. L. Luo, M. C. Tsai, *Journal of Environmental Management*, 88 (2008) 708–714.
40. M. Ahmaruzzaman, *Progress in Energy and Combustion Science*; No. 36, (2010); pp. 327-363.
41. P. Chindaprasirt, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, (2005); pp. 425-428.
42. M. K. Golapan, *ACI Materials Journal*, 1993; 90M12:117-21
43. G. C. Isaia, A.L.G Gastaldini, R. Morales, *Cement and Concrete Composites* Vol. 25, 2003; pp. 69-76.
44. S. Slanicka; *Cement and Concrete Research*; Vol. 21, 1999; pp. 285-96.
45. A. A. Almusallam, H. Beshr, M. Maslehuddin, O. S. B. Al-Amoudi, *Cement & Concrete Composites*, 26 (2004) 891–900.
46. J. Zelic, D. Rusic, D. Veza, *Cem. Concr. Res.*, 30, 1 (2000) 655-662.
47. B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 848–860.
48. K. De Weerd, M. Ben Haha, G. Le Saout, K.O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 279–291.
49. W. Li, Z. Huang, F. Cao, Z. Sun, S. P. Shah, *Construction and Building Materials* 95 (2015) 366–374.
50. Ali A. Ramezaniapour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, F. Moodi, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 715–720.
51. D. Kong, X. Du, W. Su, H. Zhang, Y. Yang, S. Shah, *Constr Build Mater* 2012;37:707–15.
52. X. He, X. Shi, *J Transp Res Board* 2008;2070:13–21.
53. S. Mindess, J. F. Young, D. Darwin, 2002. *Concrete*, second ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
54. P. V. Den Heede, M. Maes, N. De Belie, *Construction and Building Materials* 67 (2014) 74–80
55. M. Ghrici, S. Kenai, M. S. Mansour, *Cement Concrete Comp* 2007;29:542–9.
56. V. Bonavetti, H. Donza, V. Rahhal, E. Irassar, *Cem Concr Res* 2000;30(5):703–8.
57. G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, A.-M. Poppe, L. Taerwe, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 94–102.
58. G. Menéndez, V Bonavetti, E. F Irassar, *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) 61–67.
59. M. Zahedi, A. A. Ramezaniapour, A. M. Ramezaniapour, *Construction and Building Materials* 78 (2015) 354–361
60. H. Du, S. Du, X. Liu, *Construction and Building Materials* 73 (2014) 705–712.
61. A. J. Maas, J. H. Ideker, M. C. G. Juenger, *Cement and Concrete Research*, 37, (2007), 166-174.
62. L. Y. Gomez-Zamorano, J. I. Escalante, *Materiales de Construcción*, 59, 296 (2009) 5-16.