

Propiedades mecánicas y productos de reacción de cementos base pumita-cal activados con sulfato de sodio (2015)

Mechanical properties and reaction products of sodium sulfate activated pumice-lime cements (2015)

Espinoza Pérez, Léster Javier; Mercado Siles, Carlos Ariel; Arias García, Eliezer Moisés

Léster Javier Espinoza Pérez 1
lester.espinoza@fiq.uni.edu.ni
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua
Carlos Ariel Mercado Siles
cmercadosiles@hotmail.com
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua
Eliezer Moisés Arias García
eliezer0007@hotmail.com
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

Revista Científica de Ciencia y Tecnología El Higo
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua
ISSN-e: 2413-1911
Periodicidad: Anual
vol. 10, núm. 2, 2020
alba.diaz@norte.uni.edu.ni

Recepción: 20 Junio 2020
Aprobación: 24 Agosto 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/230/2301906003/>

Resumen: Se evaluaron las propiedades mecánicas y se identificaron los productos de reacción de diversas pastas y morteros elaborados a base de pumita (P) y cal apagada (C) en presencia de sulfato de sodio (SS) como activador, expuestos a distintos niveles de temperatura durante diferentes intervalos de tiempo. Se evaluaron factores tales como la relación pumita/cal apagada (P/C), determinándose que a medida que la cantidad de cal aumentaba la resistencia mecánica a la compresión (RMC) de los morteros también aumentaba; el contenido de SS, determinándose que la RMC de los morteros disminuía al incrementar el contenido de SS de un 6% a un 8%; y los tiempos de exposición a diversas temperaturas de exposición, determinándose que al incrementar los tiempos de exposición a altas temperaturas (90 °C) la RMC de los morteros decrecía debido a las pérdidas de agua en la matriz cementante. Las condiciones óptimas que permiten alcanzar la máxima RMC a 28 días de curado son: una relación másica P/C de 60/40, un contenido en peso de 6% de SS para la mezcla cementante y curado de 1 hora de exposición a 40 °C. Además, se identificó la presencia de productos de reacción tales como Silicato de Calcio Hidratado (CSH), ettringita, portlandita y carbonato de calcio al analizar la pasta de la mezcla de mejor desempeño mecánico a través de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Las bandas a 3640 y 460 cm⁻¹, correspondientes a las vibraciones provenientes del Ca(OH)₂ y SiO₂, respectivamente, se presentaron desde 1 hasta 28 días de curado de la mezcla óptima, lo cual sugiere que aún después de los 28 días de curado es posible que las RMC incrementen, pues aún existe material por reaccionar.

Palabras clave: pumita, cal, activación alcalina, cemento alternativo.

Abstract: The mechanical properties were evaluated and the reaction products of various pastes and mortars made from pumice (P) and slaked lime (C) in the presence of sodium sulfate (SS) as activator, exposed to different temperature levels during different time intervals were identified. Factors such as the pumice / slaked lime (P / C) ratio were evaluated, determining that as the amount of lime increased, the mechanical compressive strength (RMC) of the mortars also increased; the content of SS, determining that the RMC of the mortars decreased by

increasing the content of SS from 6% to 8%; and the exposure times at various exposure temperatures, determining that by increasing the exposure times at high temperatures (90 °C) the CMR of the mortars decreased due to water losses in the cementitious matrix. The optimal conditions that allow reaching the maximum RMC at 28 days of curing are: a mass ratio P / C of 60/40, a content by weight of 6% of SS for the cementitious mix and curing of 1 hour of exposure to 40 ° C. In addition, the presence of reaction products such as Hydrated Calcium Silicate (CSH), ettringite, portlandite and calcium carbonate was identified when analyzing the paste of the mixture with the best mechanical performance through Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The bands at 3640 and 460 cm⁻¹, corresponding to the vibrations from Ca (OH) 2 and SiO₂, respectively, occurred from 1 to 28 days of curing of the optimal mix, which suggests that even after 28 days After curing, it is possible that the CMR will increase, as there is still material to react.

Keywords: pumice, lime, alkaline activation, alternative cement.

INTRODUCCIÓN

El cemento Portland ordinario (CPO) es el ligante por excelencia utilizado en la construcción de obras civiles en todo el mundo. Sin embargo, su fabricación resulta nociva al medio ambiente, pues debido a la descomposición de la piedra caliza (CaCO₃) utilizada como materia prima y al uso de combustibles fósiles durante su fabricación, se libera una gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂), se estima que en total se genera casi una tonelada de CO₂ por tonelada de clinker producida (Ali et al., 2011; José Iván Escalante García, 2002; Pour-Ghaz, 2013). Aunado al impacto ambiental inherente a su producción, debe considerarse el alza en el precio del cemento, que, en Nicaragua, el incremento en los costos de materia prima, de producción y de transporte llevaron a un incremento del 5.5% del precio del cemento para el año 2018 con tendencia a incrementar en años posteriores.

Bajo este contexto surgen los cementos alternativos que se definen como materiales sustentables capaces de satisfacer las necesidades de construcción y de vivienda de las generaciones presentes sin perjudicar la habilidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas. Dichos materiales pueden sustituir parcial o totalmente al cemento portland ordinario (CPO) sin detrimento significativo en las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material, estos materiales presentan la ventaja de no demandar altos consumos energéticos para su producción, lo que los hace baratos y amigables con el ambiente. Entre estos materiales se encuentran las puzolanas, que fueron implementadas en la construcción de edificaciones durante el imperio romano, y algunas de éstas hasta la fecha permanecen en pie. Entre estas puzolanas se encuentra la pumita, la cual según explica (Shi et al., 2006), es una roca volcánica que debido a su estructura

NOTAS DE AUTOR

- 1 Léster Espinoza Pérez es Ingeniero Químico por la UNI de Nicaragua, Maestro-en Ciencias y Doctor-en Ciencias por el Cinvestav de México. Realizó su tesis de Ingeniería y Maestría en el área de cementos alternativos, publicando sus resultados en revistas científicas nacionales e internacionales tales como Nexo-UNI y Construction & Building Materials (I.F: 4.419, Q1). Su trabajo doctoral se centró en el desarrollo de recubrimientos cerámicos de circonita mediante deposición química en fase vapor para su uso como barreras ambientales en reactores nucleares de sales fundidas, investigación llevada a cabo dentro del proyecto SAMOFAR, financiado por la Unión Europea bajo el contexto Horizonte 2020, publicando sus resultados en la revista *Ceramics International* (I.F: 3.830, Q1) en colaboración con el Oak Ridge National Laboratory de Estados Unidos y la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es Profesor Titular de la UNI, además se ha desempeñado como jefe del Departamento de Química de junio 2014-agosto 2016. También fue investigador del proyecto TAISHIN, financiado por la cooperación japonesa en Nicaragua.

vítrea y composición química rica en SiO₂ presenta propiedades puzolánicas. Por ende, este estudio se orienta al desarrollo y evaluación de las propiedades mecánicas y químicas de diversas mezclas cementantes utilizando pumita como materia prima activada con hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] y sulfato de sodio [Na₂SO₄], con el propósito de corroborar el uso potencial de esta materia prima Nicaragüense en la construcción civil moderna, lo que le dará valor agregado a dicho material.

METODOLOGÍA

La pumita utilizada en la presente investigación provino de la Comarca La Corteza en Masaya, Nicaragua y fue tamizada por la malla N°5 y posteriormente pulverizada utilizando un molino de bolas MB-600 durante 2 horas con una relación bolas/carga de 3.75/1, utilizando bolas de distinto diámetro (bolas de 3 y 4 cm de diámetro), hasta alcanzar una finura máxima de 30 µm (95% de la muestra pasó por la malla N° 500). La composición química de la pumita se determinó mediante la técnica de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X, con dispersión de longitud de onda, utilizando un equipo Thermo Scientific ARL 9900. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos:

1
Composición química de la pumita utilizada

Oxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
%peso	62.7	15.7	4.2	4.3	1.6	0.3	3.2	1.6	0.3

Puede observarse de la Tabla 1 que se trata de un material silico-aluminoso, con una relación SiO₂/Al₂O₃ ~4, similar a la reportada por otros autores (Allahverdi et al., 2008).

Como fuente de Ca(OH)₂ se utilizó cal apagada, 82% Ca(OH)₂, adquirida en la empresa Bloque Roca ubicada en Managua, Nicaragua, la cual distribuye cal apagada de la empresa GRUPO CALIDRA. Por otra parte, se utilizó sulfato de sodio con 99% de pureza, adquirido en Distribuidora Mayorga ubicada en Managua. Como agregado fino para la elaboración de morteros se utilizó arena silícea proveniente del cerro Motastepe en Managua, la cual fue tamizada por la malla N° 4 y posteriormente secada a 110 °C por 24 horas.

Se varió la relación en peso pumita/cal (P/C) a valores de 80/20, 70/30 y 60/40 y el % en peso de Na₂SO₄ como activador (%SS) a valores de 4, 6 y 8% en peso con respecto al peso de la mezcla de ligantes. Las pastas y morteros fueron fraguados en moldes cúbicos de 5 cm por lado durante 24 horas a temperatura ambiente (aprox. 32 °C) y después fueron desmoldados y curados a temperatura ambiente (aprox. 32 °C), 40 y 90 °C por periodos de tiempo de 1, 2 y 3 horas, y finalmente se dejaron continuar las reacciones de hidratación a temperatura ambiente hasta por 28 días. En la Tabla 2 se presenta el arreglo ortogonal Taguchi L9 (3⁴) utilizado en la presente investigación:

2

Arreglo ortogonal Taguchi L9 (3⁴) utilizado

Nomenclatura	Relación másica P/C	%SS	Temperatura de exposición (°C)	Tiempo de exposición (h)
M1	80/20	4	Ambiente	-
M2	80/20	6	40	2
M3	80/20	8	90	3
M4	70/30	4	40	3
M5	70/30	6	90	1
M6	70/30	8	Ambiente	-
M7	60/40	4	90	2
M8	60/40	6	Ambiente	-
M9	60/40	8	40	1

Se fabricaron pastas y morteros de acuerdo con la Tabla 2, utilizando para todos los casos una relación constante agua/ligante de 0.62/1 y arena/ligante de 3/1, para ello se utilizó una mezcladora de movimiento planetario marca Hobart, posteriormente las pastas y morteros fueron fraguados y curados como se mencionó anteriormente, la activación térmica se llevó a cabo en un horno de convección mecánica Barnstead Thermolyne modelo OV47450. Para cada una de las mezclas de la Tabla 2 se midió la resistencia mecánica a la compresión a los 7 y 28 días de curado en probetas cubicas de mortero de 5 cm por lado. Las pruebas se realizaron por triplicado y se reportó el promedio de las 3 mediciones, los ensayos mecánicos se realizaron utilizando una máquina de ensayo a la compresión marca Controls Pilot 4 modelo 1250974004. Mediante un análisis de efectos principales se seleccionó la mezcla óptima de mejor desempeño mecánico a 28 días, además, se midió su pérdida de peso en probetas cubicas de morteros al ser expuesta a 40 y 90 °C por 1, 2 y 3 horas, y finalmente se identificaron los productos de hidratación en pastas de dicha mezcla óptima mediante un espectroscopio infra rojo marca Mattson Génesis IIFTIRTM en modo de transmitancia en un rango de frecuencia comprendido entre 400- 4000 cm⁻¹. Se prepararon pastillas con bromuro de potasio (KBr) grado FTIR, por prensado, las cuales contenían aproximadamente un 90% KBr y 10% de las muestras a analizar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos principales de las variables en estudio sobre la RMC

La Tabla 3 presenta los resultados (promedio de 3 mediciones) de la RMC medida para cada una de las mezclas en estudio, a las condiciones de curado propuestas. Por comparación se introdujeron los valores de RMC de morteros de cemento portland ordinario (CPO), fabricados con la misma relación agua/ligante y arena/ligante y curados a ambiente:

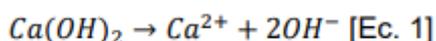
Resultado del ensayo de RMC de los morteros

Especímen evaluado	RMC promedio (MPa)	
	7 días	28 días
M1	5.10	5.25
M2	6.67	6.06
M3	4.90	4.98
M4	5.71	7.83
M5	7.60	9.11
M6	5.28	7.61
M7	6.52	9.21
M8	7.71	11.32
M9	8.15	12.72
CPO	10.34	19.60

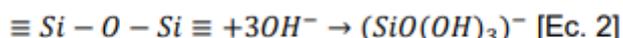
En los resultados de los ensayos mecánicos, la RMC máxima alcanzada fue de 12.72 MPa a 28 días para la mezcla cementante M9 (curada a 40 °C por 1 hora); lo cual equivale a un 65% de la RMC de morteros de cemento portland a la misma edad de curado. Seguida por la mezcla M8 la cual, sin haber sido expuesta a temperaturas superiores al ambiente (32 °C) alcanzó una resistencia promedio de 11.32 MPa (11% por debajo de la resistencia máxima alcanzada en M9). Por otro lado, la resistencia mínima alcanzada fue de 4.98 MPa para la mezcla cementante M3, que fue curada a las condiciones extremas de temperatura y tiempo de exposición evaluadas en este estudio (90 °C durante 3 horas).

Relación P/C

En la Figura 1 se presentan los efectos principales de las variables en estudio sobre la RMC promedio a 28 días de curado. Puede observarse de la Figura 1 que la RMC incrementa de manera lineal a medida que incrementa el contenido de cal en la mezcla cementante. Para el grupo con mezclas cementantes de relación P/C: 80/20 se obtuvieron RMC promedio de 5.43 MPa a los 28 días de curado, mientras que para el grupo con mezclas cementantes de relación P/C: 70/30 se obtuvieron RMC promedio de 8.18 MPa para la misma edad de curado y para el grupo de relación P/C: 60/40 se obtuvieron RMC promedio de 11.08 MPa también a los 28 días de curado. Es posible asumir que la cal agregada esté reaccionando con los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al presentes en la pumita, ya que por sí solo, el Ca(OH)₂ agregado tiene poco o nulo valor cementoso (Escalante-García et al., 2009), y no aporta a la RMC. De acuerdo con (Shi et al., 2006), en medio acuoso, el Ca(OH)₂ se hidroliza, aumentando el pH de la reacción hasta alcanzar valores de aproximadamente 12.5. Este fenómeno se representa a través de la siguiente reacción:

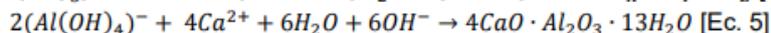
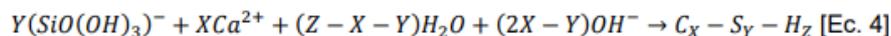


Debido al medio altamente alcalino, los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, presentes en la pumita se disuelven formando mono-silicatos y especies de aluminatos a través de las siguientes reacciones:



La dilución de estos componentes es la fase más tardada de la reacción y por lo tanto define la cinética del proceso. Los mono-silicatos y especies de aluminatos formados reaccionan con los iones disueltos para formar silicato de calcio hidratado (C_x-S_y-H_z) y aluminato de calcio hidratado, principales responsables de

las propiedades mecánicas de las mezclas cementantes (Escalante-Garcia et al., 2002, 2009; J. Ivan Escalante García et al., 2006):

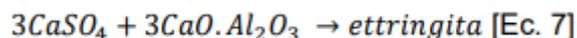


Dosis del SS

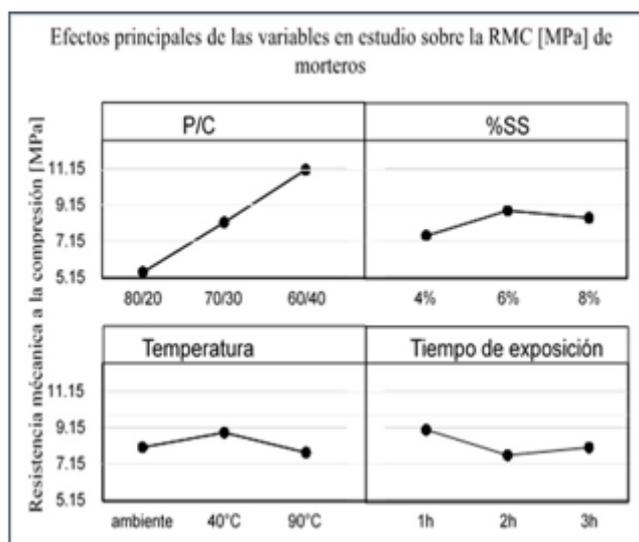
En la Figura 1 también se observa que existe un incremento en la RMC de 7.43 a 8.83 MPa al aumentar el %SS de un 4% a un 6%, sin embargo, al incrementar de un 6% a un 8% la RMC disminuye ligeramente a 8.44 MPa. Probablemente, una de las razones por las cuales se presenta este comportamiento ante la presencia del Na₂SO₄ es que los iones SO₄²⁻ reaccionan con los iones Ca²⁺ provenientes de la cal para la formación del CaSO₄, de acuerdo con la siguiente reacción:



La formación de ettringita a partir del CaSO₄ formado puede ser perjudicial para las propiedades mecánicas (Escalante-Garcia et al., 2009) y dependerá de la proporción de CaSO₄ presente, cuando esta proporción es baja (4% SS), se formará la ettringita durante el principio de la hidratación y luego se convertirá a monosulfato aluminato de calcio (o fase AFm). Cuando la proporción es intermedia (6% SS), solo una fracción de la ettringita se convertirá en AFm y ambas fases podrían coexistir, mientras que es improbable que la ettringita se convierta en AFm para proporciones elevadas de CaSO₄ (8% SS):



La ettringita presente en la matriz cementante es un material expansivo (Shi et al., 2006) que, aunque a edad temprana favorece la RMC, a edades tardías se expande causando el fisuramiento y comprometiendo la RMC de las probetas de cemento.



1

Efectos principales de las variables en estudio sobre la RMC (MPa) de los morteros evaluados

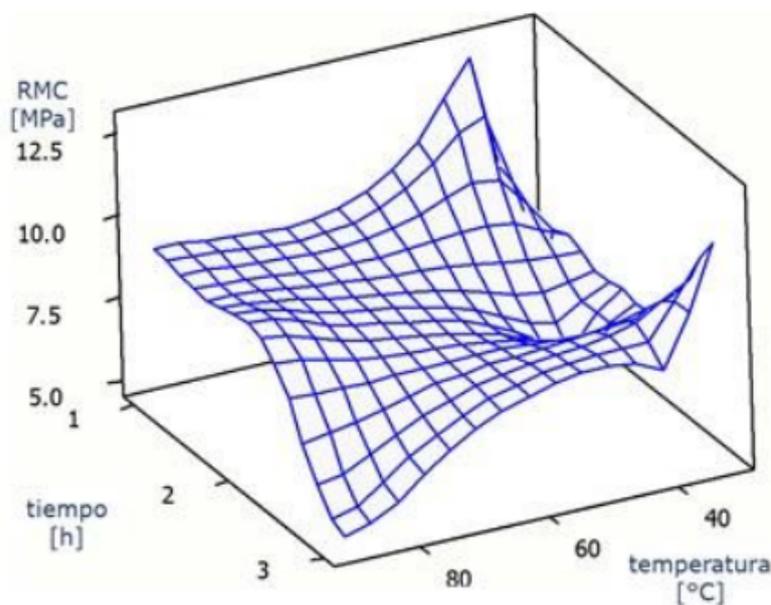
Los resultados obtenidos son similares a los reportados por (Shi et al., 2006), quienes observaron un incremento lineal en la resistencia a la compresión a 28 días entre 6-12 MPa con el incremento de la

concentración de Na_2SO_4 entre 1-5% en peso. Por su parte (Allahverdi et al., 2008) activó pastas de pumita con soluciones alcalinas de silicato de sodio, obteniendo resistencias a compresión de hasta 50 MPa a 28 días. Aunque las soluciones de silicato de sodio han demostrado ser efectivas para la activación química de diversas puzolanas naturales e industriales, su producción es costosa para el medio ambiente, ya que requiere el calentamiento de mezclas de arena de sílice y carbonato de sodio (Na_2CO_3) alrededor de 1000 °C, desprendiendo a la atmósfera 1.5 kg CO_2 /kg de silicato de sodio obtenido (Turner & Collins, 2013).

Por otra parte, (Almalkawi et al., 2017) formularon cementos hidráulicos base pumita con 15-40% en peso de sulfato de sodio, activados térmicamente a 700 °C por 4 horas y posteriormente enfriados a temperatura ambiente y molidos a una finura similar a la del cemento portland. En dicho estudio se reportó una resistencia a compresión máxima de 10 MPa a 28 días para la mezcla con 75% en peso pumita y 25% en peso Na_2SO_4 . La resistencia a compresión de 10 MPa obtenida por (Almalkawi et al., 2017) es incluso menor a la resistencia a la compresión máxima reportada en el presente estudio (12.72 MPa) y no justifica el uso de temperaturas de 700 °C, pues, como se demuestra en el presente trabajo, es posible obtener similares resistencia a la compresión con tan solo 1 hora de curado a 40 °C (mezcla M9).

Tiempo de exposición a diferentes temperaturas

La Figura 2 complementa a la Figura 1 y muestra la influencia de la combinación de variables tiempo y temperatura de exposición sobre la RMC alcanzada a los 28 días de las probetas cúbicas de mortero evaluadas. En la Figura 2 se aprecia que las RMC más altas se encuentran ubicadas en la zona de las temperaturas más bajas evaluadas (40 °C y condiciones ambientales) y que a medida que se incrementa el tiempo de exposición a altas temperaturas la RMC decrece, alcanzándose la RMC mínima a las condiciones extremas de temperatura (90 °C) y tiempo de exposición (3 horas). Este comportamiento se debió probablemente a la evaporación del agua al exponer las muestras a altas temperaturas.

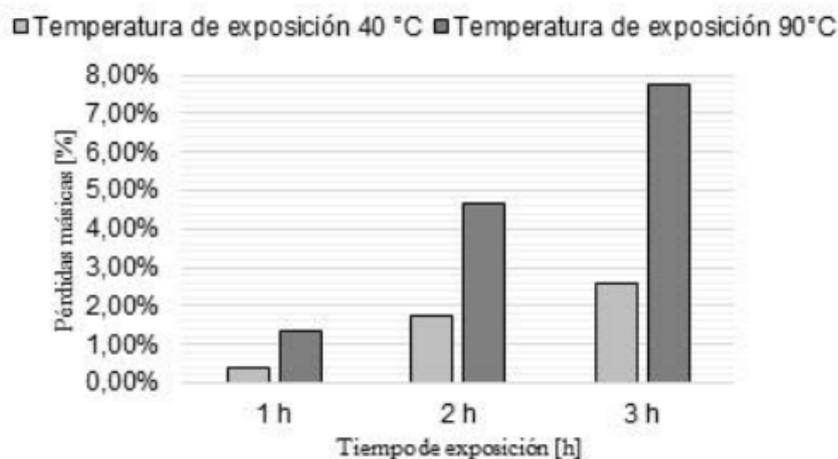


2

Efecto de las condiciones de curado sobre la RMC de las probetas cúbicas de mortero

Por la suposición anterior, se midieron las pérdidas de masa en probetas cúbicas de mortero de la mezcla M9 al ser expuesta a 40 o 90 °C por 1, 2 y 3 horas. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos, se puede observar que las pérdidas de peso son de 0.39, 1.71 y 2.57% al exponerse a 40 °C por 1, 2 y 3 horas, respectivamente, mientras que las pérdidas de peso incrementaron a 1.33, 4.65 y 7.74% al exponerse a 90 °C por 1, 2 y 3 horas, respectivamente. Se considera que la reducción en la masa de la muestra es debido a la evaporación del agua contenida en la mezcla y que las pérdidas de agua comprometieron el desarrollo de la RMC de las probetas

cúbicas de mortero evaluadas, ya que el agua provee el medio necesario para que se den las reacciones, por lo tanto, al reducir la cantidad de reactivos, se reduce también la cantidad de productos de reacción, lo cual se traduce en un bajo desarrollo de RMC en las probetas cúbicas de mortero.



5

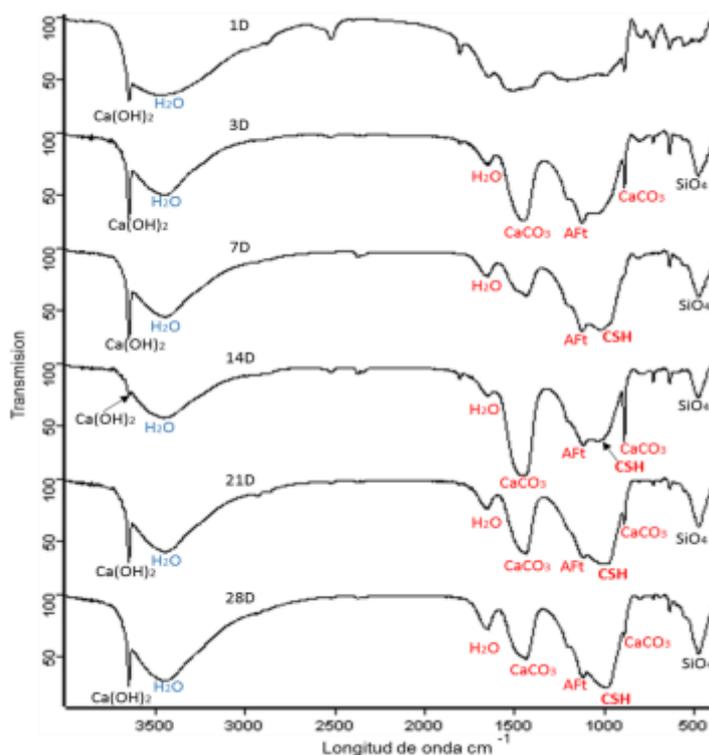
Efecto de las condiciones de curado sobre la RMC de las probetas cúbicas de mortero

Determinación de la mezcla y condiciones óptimas de curado

De las Figuras 1 y 2 se puede concluir que las condiciones óptimas que permiten alcanzar la máxima RMC para los 28 días de curado son: una relación máxica P/C de 60/40, un contenido en peso de 6% de SS para la mezcla cementante y curado de 1 hora de exposición a 40 °C. La relación P/C ejerce la mayor influencia sobre los resultados de RMC obtenidos, lo cual puede verse reflejado en la correlación lineal entre la relación P/C y la RMC de la Figura 1. Las demás variables en estudio (%SS, temperatura y tiempo de exposición), ejercen una menor influencia en el desarrollo de RMC a 28 días de curado.

Descripción de los espectros IR de la mezcla óptima a distintas edades de curado

Se fabricaron pastas de la mezcla óptima y se dio seguimiento a los productos de reacción a 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado mediante espectroscopia infra roja por transformada de Fourier. La Figura 4 presenta los resultados obtenidos, en ésta se señalan los compuestos identificados y que son de interés en el estudio de materiales cementantes. Se puede observar que la pasta óptima presenta un pico agudo a 3640 cm⁻¹ debido a la vibración de los grupos OH- provenientes del Ca(OH)₂ (presente en la cal utilizada). Este pico se presenta durante todas las edades que se analizaron, lo cual sugiere que aún después de los 28 días de curado es posible que las RMC incrementen pues aún existe material por reaccionar.



4

Espectros IR de pasta de cemento óptima a 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado

Entre los 3600 y los 3200 cm^{-1} se presenta una banda ancha, originada por la vibración del OH- del agua fisisorbida, esta banda indica la presencia de humedad en la pasta. Puede observarse que la intensidad de esta banda es más alta en el primer día de curado, lo que indica que la pasta ha perdido humedad en días posteriores debido al efecto de las condiciones de curado (el agua migra al ambiente y la pastas se seca) o bien debido a la generación de productos de hidratación (el agua deja de estar fisisorbida y pasa a formar parte de los productos de reacción, gel $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$).

La banda entre 1660-1640 cm^{-1} indica la presencia de agua químicamente enlazada, y es causada por los compuestos formados por hidratación, tal como tobermorita ($3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$). La tobermorita es una de las formas cristalinas del gel $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$, causante del endurecimiento de los cementos.

En la región de 1400 cm^{-1} aparece una banda ancha (entre los 1500 y 1370 cm^{-1}), la cual podría corresponder a la vibración del CO_3^{2-} en el CaCO_3 , formado por la acción del CO_2 atmosférico sobre el Ca(OH)_2 . De acuerdo con (Vázquez Moreno, 1976), el pico leve que se presenta a los 2514 cm^{-1} y el pico agudo de los 875 también corresponden modos de vibración que indican la presencia del CaCO_3 .

A 1110 cm^{-1} aparece una banda de intensidad media, la cual puede atribuirse a la vibración del enlace SO_4 de la ettringita (AFt) (). Tal y como se explicó, la ettringita (AFt) es resultado de la presencia de los iones sulfatos en el matriz cementante. Puede observarse que al primer día de curado la banda característica de la ettringita aún no estaba definida y que aparece a partir del tercer día de curado.

A partir del tercer día de curado se observa la formación de un pequeño halo entre los 1100 y los 970 cm^{-1} , y puede observarse que la intensidad de este halo incrementa a edades posteriores dando lugar una banda muy intensa que puede ser atribuida a la formación de gel $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$ (tobermorita), compuesto producido en la hidratación de silicatos cuya presencia corrobora las propiedades cementantes de la mezcla evaluada.

Finalmente, la banda a 460 cm^{-1} es debida a la vibración de deformación del SiO_4 . Esta banda se presenta durante todas las edades de curado analizadas, lo cual sugiere que aún después de los 28 días de curado es posible que las RMC incrementen pues aún existe material por reaccionar.

CONCLUSIONES

Al incrementar el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en las mezclas cementantes pumita/cal, la resistencia mecánica a la compresión de las probetas cúbicas de los morteros también incrementó, esto debido al hidrolisis del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y al incremento del pH del medio, facilitando la disolución de los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al presentes en la pumita, y la formación de $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$, principal responsable del endurecimiento y ganancia de resistencia mecánica de los morteros. La dosis óptima de sulfato de sodio correspondió a un 6% en peso con respecto al peso de la mezcla cementante. Se observó un incremento de la resistencia a la compresión al incrementar de 4 a 6% de sulfato de sodio, sin embargo, al incrementar la dosis a 8% la resistencia disminuyó ligeramente, pues el exceso de sulfatos probablemente promovió la formación de ettringita, que a edades tardías perjudica la resistencia a compresión de las probetas cúbicas de mortero. Por otra parte, a medida que se incrementó la temperatura de curado y su respectivo tiempo de exposición, la resistencia a la compresión de las probetas cúbicas de mortero disminuyó, se asume que este comportamiento se debió a la evaporación del agua causada al exponer las muestras a altas temperaturas. Mediante análisis de efectos principales se determinó la mezcla cementante óptima de mejor desempeño mecánico: 60% pumita-40% cal, adicionada con 6% de sulfato de sodio y activada térmicamente a 40 °C por 1 hora. Finalmente, a través de espectroscopia infra roja se lograron identificar los productos de reacción de la mezcla óptima, corroborándose la presencia de silicato de calcio hidratado ($\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$), principal responsable de la ganancia de resistencia mecánica, así como portlandita, ettringita y carbonato de calcio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Nicaragua por el apoyo otorgado al utilizar los diversos laboratorios de caracterización y por la subvención económica otorgada. Además, desean agradecer al Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) de Nicaragua por facilitar el uso de sus laboratorios de caracterización de materiales.

REFERENCIAS

- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Najafikani, E. (2008). Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzolana in production of geopolymer cement. *Ceramics - Silikaty*.
- Almalkawi, A. T., Hamadna, S., & Soroushian, P. (2017). One-part alkali activated cement based volcanic pumice. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.139>
- Escalante-García, J. I., Espinoza-Perez, L. J., Gorokhovskiy, A., & Gomez-Zamorano, L. Y. (2009). Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.002>
- Escalante-García, J. I., Méndez-Nonell, J., Gorokhovskiy, A., Fraire-Luna, P. E., Mancha-Molinar, H., & Mendoza-Suarez, G. (2002). Reactividad y propiedades mecánicas de escoria de alto horno activada por álcalis. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.3989/cyv.2002.v41.i5.664>
- Escalante García, J. Ivan, Campos-Venegas, K., Gorokhovskiy, A., & Fernández, A. (2006). Cementitious composites of pulverised fuel ash and blast furnace slag activated by sodium silicate: Effect of Na_2O concentration and modulus. *Advances in Applied Ceramics*. <https://doi.org/10.1179/174367606X120151>
- Escalante García, José Iván. (2002). *Materiales alternativos al cemento Portland*. Avance y Perspectiva.
- Pour-Ghaz, M. (2013). Sustainable infrastructure materials: Challenges and opportunities. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijac.12083>

- Shi, C., Krivenko, P. V, & Roy, D. (2006). Alkali-Activated Cements and Concretes. In Alkali-Activated Cements and Concretes. <https://doi.org/10.4324/9780203390672>
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Vázquez Moreno, T. (1976). Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopia infrarroja. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.1976.v26.i163.1225>