

Incidencia de polvo calizo, puzolana natural y escoria en hormigones expuestos a altas temperaturas

Incidence of limestone powder, natural pozzolan and slag on concrete exposed to high temperature

Carrizo, Leandro; Villagrán-Zaccardi, Yury; Píttori, Alejandro; Zega, Claudio

Leandro Carrizo

hormigones@lemit.gov.ar

LEMIT-CICPBA, La Plata, Argentina

Yury Villagrán-Zaccardi

LEMIT-CICPBA - CONICET - Departamento de Ingeniería Civil, UTN-FRLP, La Plata, Argentina

Alejandro Píttori

LEMIT-CICPBA, La Plata, Argentina

Claudio Zega

LEMIT-CICPBA - CONICET, La Plata, Argentina

Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-e: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua

vol. 2, 2020

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 18 Diciembre 2019

Aprobación: 24 Abril 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2661113007/>

Resumen: El interés por disminuir la cantidad de cemento Portland utilizado en la construcción, surge de la necesidad medioambiental de disminuir las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera. Inmediatamente aparece la obligación de conocer cómo afectan los materiales que se implementan como reemplazo parcial o total del cemento a las propiedades del hormigón. Una de las propiedades de interés es el comportamiento de estos hormigones frente a las altas temperaturas. En este trabajo se estudian hormigones elaborados con 3 tipos de adiciones (polvo calizo, escoria granulada de alto horno y una puzolana natural) en distintas proporciones de reemplazo del cemento (20 y 60% para escoria y puzolana mientras que el polvo calizo se utilizó en 10 y 30%), y un hormigón patrón. Se evaluaron resistencia, peso, velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad dinámico tanto antes como después de una exposición a 500 °C durante una hora. Las adiciones minerales no modificaron sustancialmente el comportamiento del hormigón frente a la exposición mencionada pero los beneficios relativos que ofrecen en comparación con el hormigón patrón antes del calentamiento (aumento en el rendimiento del cemento en todos los casos y mejoras en la resistencia, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de pulso ultrasónico en algunos casos), se conservan luego del deterioro por temperatura.

Palabras clave: Adiciones minerales, Alta temperatura, Resistencia residual.

Abstract: The interest in reducing the content of Portland cement used in construction, which results from the environmental need of reducing CO₂ emissions to the atmosphere, generates the necessity of knowing how materials that are used in partial or total replacement of cement affect the concrete properties. One of the properties of interest is the performance of these concretes when exposed to high temperatures. In this work, concretes made with 3 types of mineral admixtures (limestone powder, ground granulated blast-furnace slag and natural pozzolan) are studied in different proportions of cement replacement (20 and 60 % for slag and pozzolan, and 10 and 30 % for limestone powder), and contrasted with a control concrete. Strength, weight, ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity

were evaluated both before and after exposure to 500 °C for one hour. The mineral admixtures did not substantially modify the performance of the concrete against the aforementioned exposure, but the relative benefits offered in comparison with the control concrete before the heating (increase in cement efficiency in all cases and improvements in strength, dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity in some cases), are preserved after deterioration by temperature.

Keywords: Mineral admixtures, High temperature, Residual strength.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del hormigón expuesto a altas temperaturas es el resultado de muchos factores que actúan simultáneamente, pero se puede considerar que el calentamiento del hormigón produce dos efectos principales: el descascaramiento de la superficie, y la pérdida de resistencia de la matriz.

El descascaramiento de la superficie, también conocido como “spalling”, está relacionado con la cantidad de agua evaporable presente en el hormigón al momento de ser expuesto a altas temperaturas. Cuando la velocidad de evaporación es alta y la permeabilidad es baja, la presión de vapor dentro del material se incrementa a una velocidad más rápida que la presión de liberación del vapor hacia la atmósfera, generando esfuerzos de tracción sobre la superficie (Mehta, P. K., Monteiro, P.J.M., 1998). Además del contenido de humedad del hormigón y su permeabilidad, otros factores a tener en cuenta que influyen sobre el descascaramiento son la naturaleza del agregado y el estado de carga bajo el que se encuentra el hormigón. Este fenómeno ha sido estudiado por varios autores y un análisis pormenorizado puede consultarse en Smith F.P. (1991); Majorana, et al. (2010); Van der Heidjen, et al. (2012) y Gawin, et al. (2018) .

La pérdida de resistencia de la matriz comienza con la microfisuración que ocurre durante el calentamiento inicial debido a la pérdida del agua absorbida. Sin embargo, la pérdida de resistencia más significativa se da a partir de aproximadamente los 300 °C cuando se produce la deshidratación de los silicatos de calcio. A partir de 350-400 °C se pierde el agua del hidróxido de calcio. Al llegar a los 500 °C se ha perdido toda resistencia útil, sin embargo la degradación continúa hasta los 900°C (Newman, J., Choo B. S., 2003).

Se han realizado numerosos estudios que dan cuenta del efecto adverso que tienen las altas temperaturas sobre las propiedades del hormigón, pero solo algunos incluyen adiciones minerales. Donatello, et al. (2014) estudiaron el efecto de la temperatura en pastas con gran cantidad de ceniza volante, resultando un aumento en la resistencia al ser calentadas a 800 y 1000 °C. Seleem, et al. (2011) utilizaron 4 tipos de materiales puzolánicos (metakaolin, silica fume, ceniza volante y escoria de alto horno) como adiciones y en reemplazo del cemento para elaborar hormigones, que mostraron mejoras en su comportamiento a altas temperaturas ya que las reacciones puzolánicas consumen CH y forman compuestos refractarios. Anwar Hossain (2006) estudió hormigones de alta resistencia con 20% de ceniza volcánica, los cuales mostraron una mejora en su resistencia residual y propiedades durables luego de una exposición a 800 °C. Por su parte, Wang (2008) elaboró hormigones de alta resistencia con escoria y los sometió a un calentamiento de 1000 °C, concluyendo que más de 10 % de escoria reduce la fisuración. Moetaz El-Hawary, et al. (2017) realizaron estudios utilizando polvo calizo en varios porcentajes de reemplazo de cemento, concluyendo que 15% de reemplazo es una cantidad en la cual las propiedades frente a altas temperaturas no sufren cambios significativos, obteniendo las ventajas del costo y la sustentabilidad. Por lo tanto, el efecto que se reporta en la literatura respecto a las diversas adiciones sobre la resistencia del hormigón a altas temperaturas es variable, y está relacionado con los efectos puzolánicos y de dilución que las mismas pueden tener. Asimismo, la generación de silicato de calcio hidratado es un aspecto que puede generar un comportamiento diferenciado.

Este trabajo se centra en el estudio de los cambios en las propiedades de la matriz de hormigones elaborados con tres tipos de adiciones minerales expuestos a una temperatura de 500 °C durante una hora. A tal fin, las probetas evaluadas fueron estacionadas en ambiente de laboratorio durante 6 meses antes del calentamiento para garantizar la pérdida interna de humedad y evitar así el descascamiento de la superficie.

DESARROLLO

Se elaboró un hormigón con cemento Portland normal (CPN), el cual se empleó como referencia (NN), y hormigones de similares características tecnológicas en los cuales se emplearon distintas adiciones minerales como reemplazo parcial del cemento CPN. Entre las adiciones seleccionadas se encuentran un polvo calizo (C), una escoria granulada de alto horno (E) y una puzolana natural (P). La primera de ellas se empleó en 10 y 30% de reemplazo del cemento (C1 y C3), mientras que las restantes adiciones se utilizaron en reemplazos del 20 y 60% (E2, E6, P2 y P6). Los reemplazos se realizaron en peso. En las Tablas 1 y 2 se presentan las propiedades de las adiciones y del cemento, respectivamente. En la Tabla 3 se presentan las dosificaciones de cada hormigón, mientras que en la Tabla 4 pueden observarse las propiedades de las mezclas en estado fresco.

TABLA 1
Propiedades de las adiciones

	Composición química (%)										
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	Cl
Escoria	36,16	28,89	12,14	8,62	1,91	1,85	0,95	0,46	0,43	0,43	<0,01
Puzolana	1,34	62,53	1,13	10,76	5,66	0,34	1,81	0,09	3,67	0,06	<0,01
Polvo calizo	48,85	8,15	1,41	1,28	1,25	0,05	0,88	nd	0,28	0,04	<0,01
	Densidad	Distribución de tamaño de partículas (µm)			Px C (%)						
		dv10	dv50	dv90							
Escoria	2,92	1,14 ± 0,03	12,73 ± 0,67	66,27 ± 7,18	0,54						
Puzolana	2,41	1,36 ± 0,01	7,05 ± 0,02	28,14 ± 0,16	0,57						
Polvo calizo	2,71	1,27 ± 0,12	7,67 ± 0,63	72,88 ± 10,4	37,29						

TABLA 2
Propiedades del cemento

Composición química (%)							
SO ₃	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1,47	2,04	19,9	4,02	2,95	66,65	0,34	0,6
Distribución de tamaño de partículas (µm)						Pasta de consistencia normal	
dv10	dv50	dv90					
2,2	16,6	58,5	27 %				
Frugado inicial	Frugado final	RI (%)	PxC (%)				
4h 5'	5h 35'	0,55	2,33				

RI: residuo insoluble
PxC: pérdida por calcinación

TABLA 3
Dosificaciones (kg/m³)

Materiales	C1	C3	P2	P6	E2	E6	NN
Agua	153	154	154	154	154	154	153
CPN 40	311	242	276	138	276	138	345
Adición	35	104	69	207	69	207	-
Arena de río	903	893	890	854	903	893	908
Piedra partida granítica (TMA=20mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Reductor de agua de alto rango	3,164	2,852	2,385	1,919	2,4	2,015	3,127

TABLA 4
Propiedades de las mezclas en estado fresco

Hormigón	Asentamiento (cm)	Capacidad de exudación (%)	Contenido de aire (%)
C1	12,5	1,25	3,1
C3	12,5	1,14	3,2
P2	15,0	0,46	2,8
P6	15,5	0,19	3,2
E2	12,0	1,12	4,0
E6	14,0	1,99	3,7
NN	14,0	1,62	3,5

Se moldearon 6 probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro por cada uno de los hormigones en estudio. De cada grupo de 6 probetas, 3 fueron ensayadas a compresión luego de un periodo de 28 días de curado normalizado en cámara húmeda (T: 23±2 °C; HR > 95 %). Las 3 probetas restantes se mantuvieron en ambiente de laboratorio durante 6 meses para garantizar la pérdida interna de humedad, a fin de que al ser expuestas a altas temperaturas no se produzca la explosión de las mismas como consecuencia del vapor de agua en su interior.

El calentamiento se realizó a razón de aproximadamente 4 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 500 °C, que se mantuvo durante una hora. Para ello se empleó un horno eléctrico (15 kW) con control automático de temperatura, 1200°C de temperatura máxima, calentado con resistencias espiraladas de baja carga específica y ventilado en su parte superior para permitir la evaporación de gases. El enfriamiento fue gradual, dentro del mismo horno manteniendo la puerta semi abierta. Previamente al calentamiento y luego del mismo, una vez alcanzada la temperatura ambiente, se evaluaron las probetas mediante ensayos no destructivos y se determinó la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y el módulo de elasticidad dinámico (MED), a fin de evaluar la afectación que la exposición a altas temperaturas produjo sobre los hormigones

con los distintos tipos y contenidos de adiciones. La velocidad de pulso ultrasónico se calcula midiendo el tiempo de pasaje de pulsos vibratoriales longitudinales a través de una longitud de hormigón conocida. Esta velocidad depende de la densidad del material, las características elásticas del medio y de la naturaleza de la perturbación. Una mayor densidad implica una mayor VPU, y la presencia de perturbaciones implica menores VPUs, pudiendo incluso interrumpirse por completo la onda en presencia de grandes fisuras. El módulo de elasticidad dinámico se calcula a partir de medir la frecuencia de resonancia de la probeta y relacionarla con su geometría. EL MED es la relación entre esfuerzos y deformaciones bajo condiciones vibratorias, los cambios en el módulo se relacionan con la contracción y microfisuración del hormigón. A partir del MED se puede estimar el modulo de elasticidad estático. Posteriormente se determinó la resistencia a compresión residual de las probetas que sufrieron la exposición.

RESULTADOS

En la Figura 1 se muestra el peso de las probetas antes (20 °C) y después del calentamiento (500 °C), donde cada valor informado corresponde al promedio de la medición de las 3 probetas. También se indica con porcentajes la pérdida de peso relativa al peso inicial. Se observa que todas las variaciones de peso estuvieron comprendidas entre un 3 y un 4,7%.

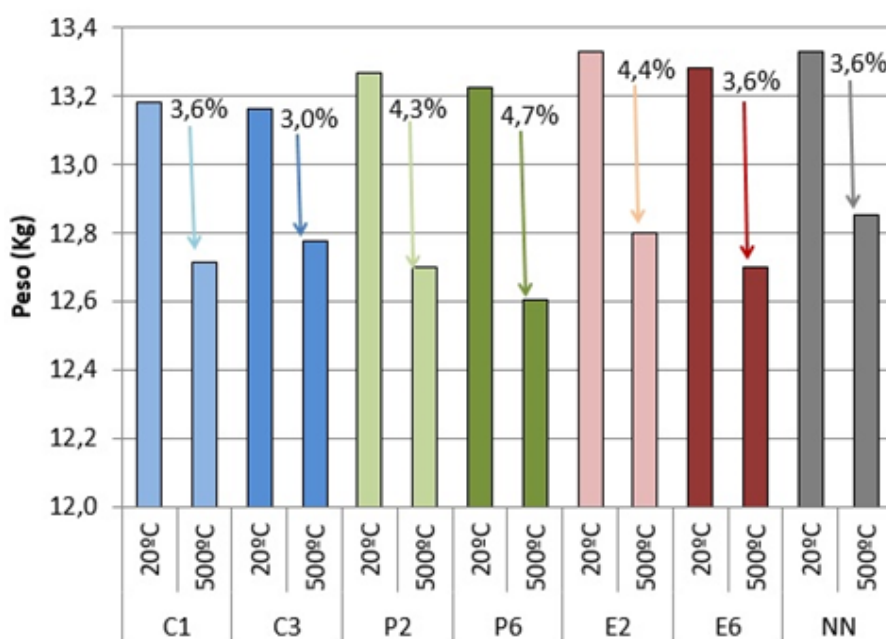


FIGURA 1
Peso antes y después del calentamiento

Los resultados de la determinación de MED se muestran en la Figura 2. Cada valor es el promedio de tres determinaciones y se incluye el desvío estándar de cada serie. Puede observarse que el decremento en el valor del MED fue del orden del 70% para todos los hormigones. Respecto al hormigón patrón, el MED de todos los hormigones antes del calentamiento estuvo en un rango de +/-10%. Después del calentamiento, el valor de MED para C1, C3 y P2 estuvo alrededor de un 15% por encima del de NN. Para los casos de P6 y E6 el MED fue inferior al de NN en aproximadamente 25%. Finalmente, el valor de E2 resultó un 5% inferior al de NN. De esta forma, el efecto de C resultó beneficioso, mientras que P y E aumentaron la sensibilidad a la temperatura del MED.

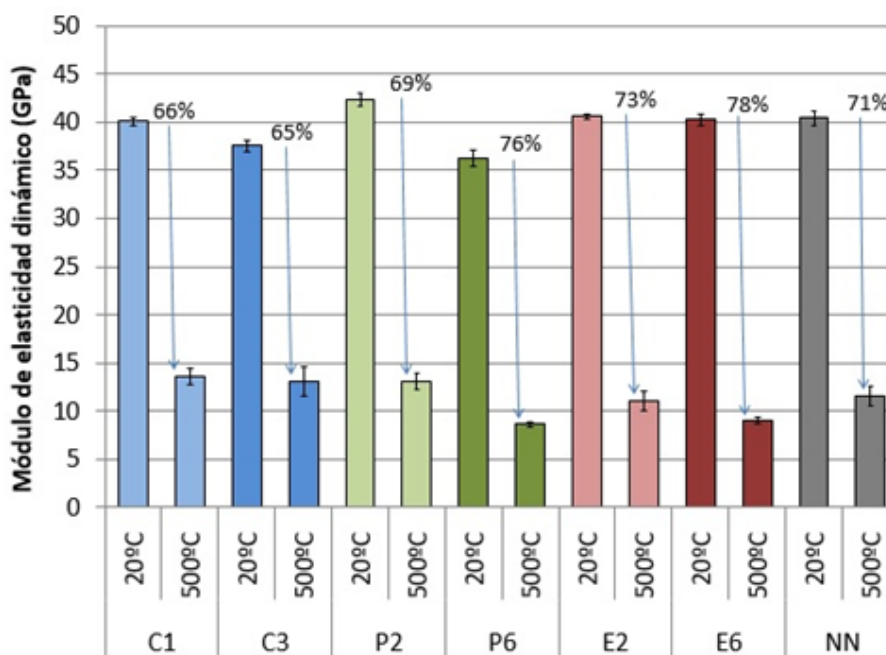


FIGURA 2

Modulo de elasticidad dinámico antes y después del calentamiento

En la Figura 3 se presentan los resultados de la VPU, donde cada valor es el promedio de tres determinaciones. También se muestra el desvío estándar de cada serie. En todos los casos la disminución de la VPU luego del calentamiento estuvo alrededor del 45%. Antes del calentamiento, todos los hormigones con adiciones presentaron variaciones menores al 4% respecto a NN. Luego del calentamiento los resultados de C1, C3 y P2 fueron superiores a los de NN en aproximadamente 10%. Para el P6 la VPU después del calentamiento fue inferior a la de NN en 7%, mientras que E2 y E6 no presentaron diferencias significativas respecto a este último. En este sentido, la VPU presenta menor sensibilidad que el MED al daño provocado por la temperatura. Esto es similar a resultados del efecto de la temperatura analizados previamente por Tropea, et al. (2014) y está relacionado con la longitud de onda en relación al tamaño de la muestra.

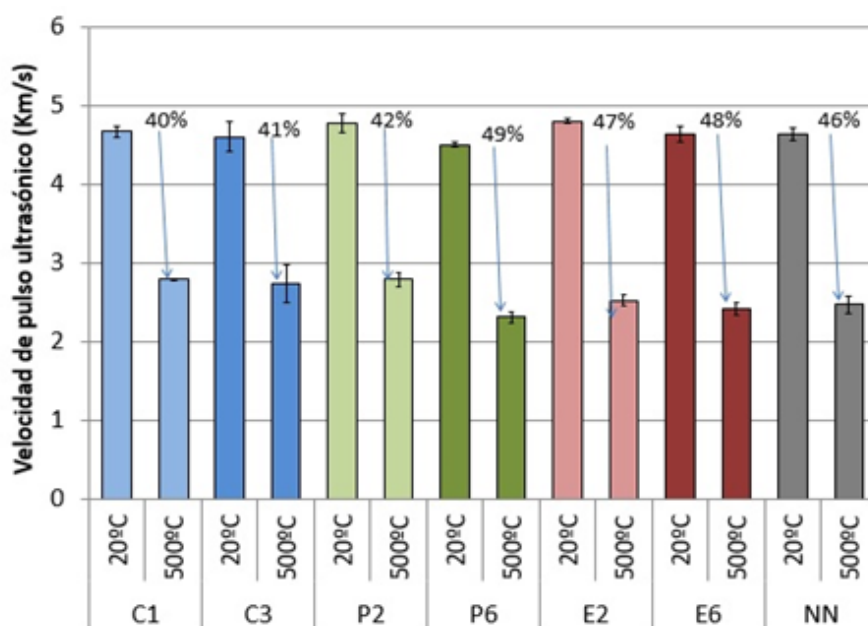


FIGURA 3
Velocidad de pulso ultrasónico antes y después del calentamiento

La resistencia a compresión antes y después del calentamiento se presenta en la Figura 4, donde cada valor es el promedio de 3 determinaciones. Además se incluye el desvío estándar de cada serie y el porcentaje de pérdida de resistencia respecto al valor inicial. La disminución de resistencia luego del calentamiento estuvo comprendida entre 17 y 24%, con la excepción de C3, el cual disminuyó su resistencia solo un 6,8%. Respecto al hormigón patrón antes del calentamiento, la resistencia de C3 fue un 25,7% menor y la de P2 estuvo un 17% por encima de la de NN, mientras que para el resto de los hormigones la variación de la resistencia respecto a NN se mantuvo dentro de +/-10%. Luego del calentamiento la resistencia de P2 estuvo un 24,9% por encima de la de NN, mientras que la resistencia del resto de los hormigones estuvo en un rango de +/-10% respecto a la de NN.

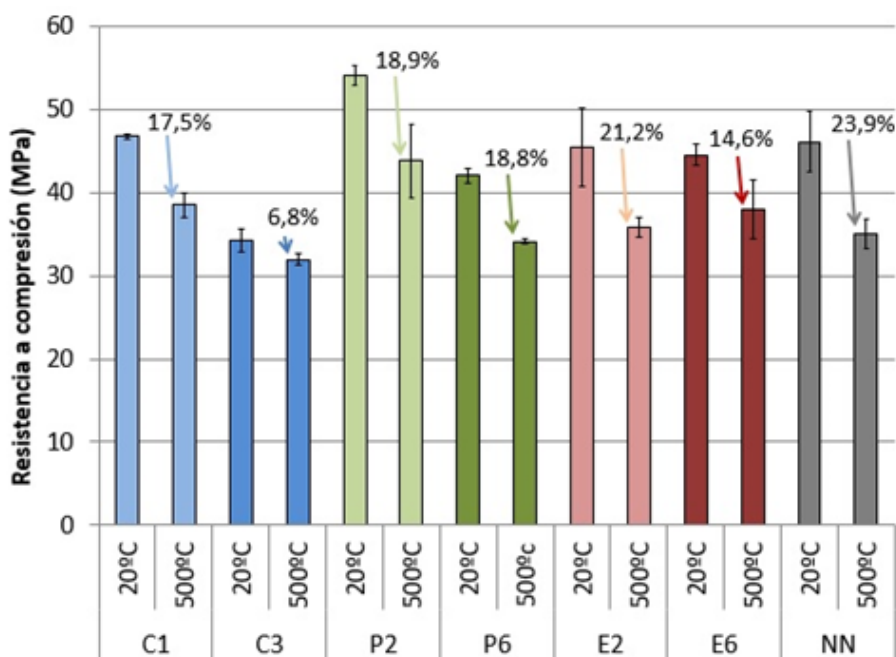


FIGURA 4
Resistencia a compresión antes y después del calentamiento

En la Figura 5 se presenta la eficiencia del cemento como la resistencia a compresión dividida por el contenido unitario de cemento. También se indica el porcentaje de disminución de la eficiencia respecto al valor inicial. Es de destacar que las tres adiciones empleadas en los distintos porcentajes mencionados muestran un efecto beneficioso sobre la eficiencia del cemento, aún luego de la exposición a alta temperatura. Tanto antes como después de la exposición, el rendimiento del cemento en los hormigones con C estuvo alrededor de un 15 % por encima del rendimiento en el hormigón patrón. Luego de la exposición, para el caso de P2 la mejora en el rendimiento estuvo alrededor del 50%, mientras que en P6 el rendimiento superó en aproximadamente 130% al del hormigón patrón. El rendimiento del cemento de E2 estuvo aproximadamente un 20% por encima del de NN, y en el caso de E6 el rendimiento superó al de NN en aproximadamente 150%. Los resultados muestran que C resulta ser la adición que mejora más notablemente la sensibilidad del hormigón a alta temperatura en términos absolutos. Su carácter mayormente inerte le permite favorecer la hidratación del cemento sin generar C-S-H por sí mismo. El C-S-H es obviamente la fase más afectada por altas temperaturas y la que determina la pérdida de resistencia.

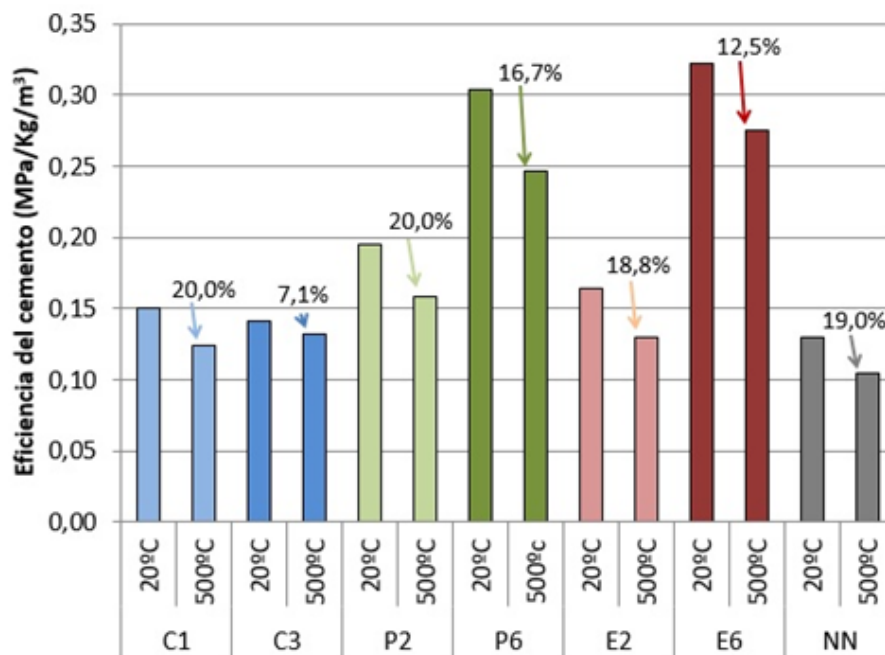


FIGURA 5
Eficiencia del cemento

En la Figura 6 se presentan a modo de resumen los resultados de resistencia a compresión en el eje de abscisas y los valores de MED en el eje de ordenadas, de todos los hormigones estudiados incluyendo el hormigón de referencia. Los valores en la parte superior del gráfico son los obtenidos antes del calentamiento y los valores de la parte inferior fueron obtenidos después del calentamiento.

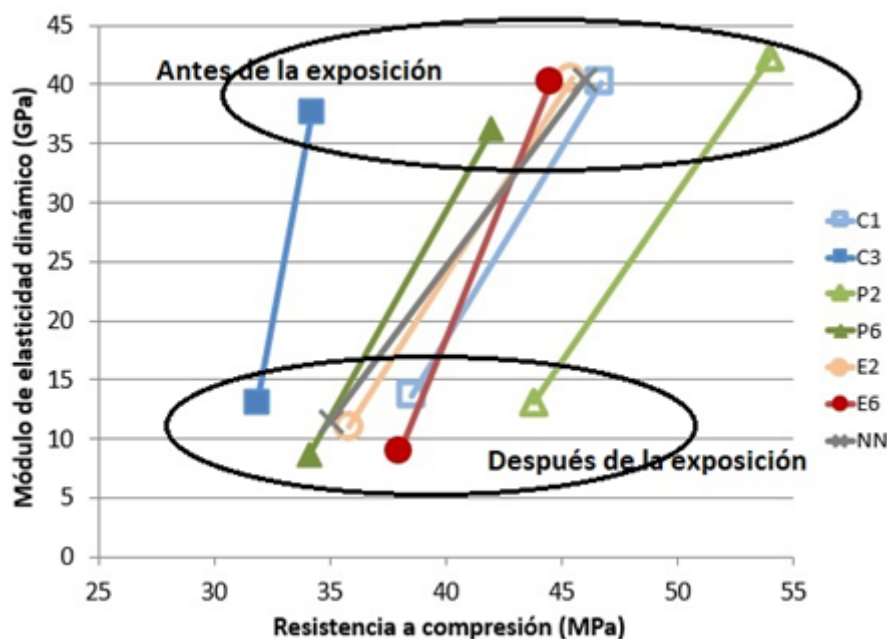


FIGURA 6
Módulo de elasticidad dinámico vs. Resistencia a compresión

En la Figura 7 se presentan los resultados de resistencia a compresión en el eje de abscisas y los valores de VPU en el eje de ordenadas, de todos los hormigones estudiados incluyendo el hormigón de referencia.

Los valores en la parte superior del gráfico son los obtenidos antes del calentamiento y los valores de la parte inferior fueron obtenidos después del calentamiento.

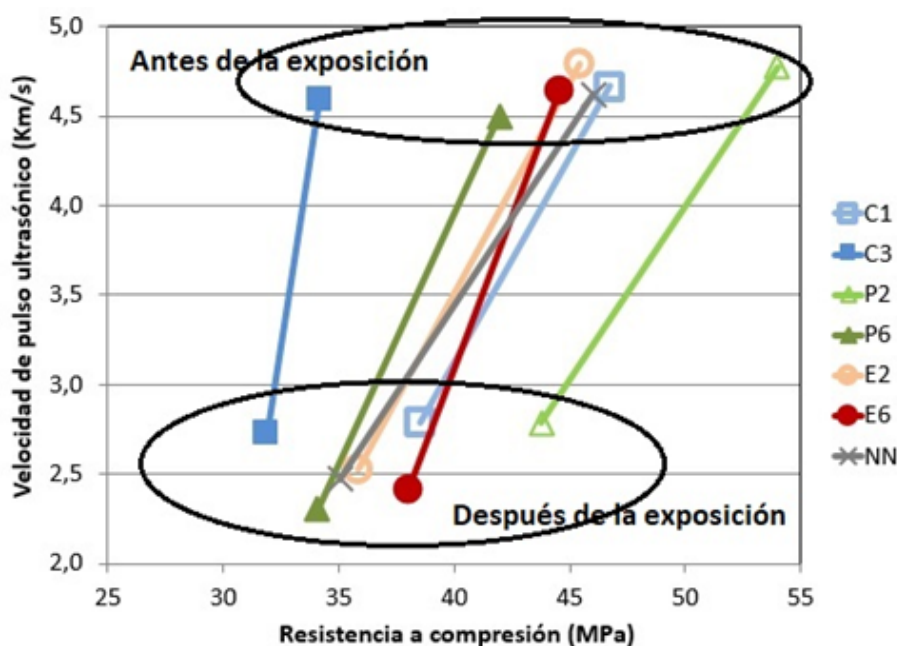


FIGURA 7
Velocidad de pulso ultrasónico vs. Resistencia a compresión

A partir del conjunto de resultados presentados, la principal diferenciación entre las adiciones estudiadas está dada por la presencia o ausencia de actividad puzolánica. En los hormigones elaborados con C, la menor pérdida de resistencia luego de la exposición puede atribuirse a que esta adición, a diferencia de las restantes, no favorece la formación de C-S-H, compuesto que se deshidrata a partir de los 300 °C. Aún así, en los hormigones que contienen puzolana el efecto negativo de generar mayor cantidad de C-S-H se ve compensado por la mayor inercia térmica que le confiere la densificación de la matriz que esta adición provoca. Por lo tanto el calor afecta un menor espesor de la probeta que en el caso del hormigón patrón. Por lo tanto, todas las adiciones analizadas se presentan como ventajosas respecto a la sensibilidad del hormigón a la exposición a altas temperaturas.

En el caso particular de la escoria, sus productos de reacción e hidratación son similares a los del cemento Portland, por lo cual los hormigones E2 y E6 tienen una composición similar al hormigón patrón pero, como ocurre con los hormigones con puzolana, una matriz más densa que aumenta su inercia térmica, lo cual podría explicar que su pérdida de resistencia sea levemente menor a la del hormigón patrón.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados con hormigones que contenían tres tipos de adiciones minerales (polvo calizo, escoria granulada de alto horno y puzolana natural), en distintos porcentajes de reemplazo de CPN, realizados antes y después de su exposición a 500 °C durante 1 hora, puede concluirse que:

- Al utilizar adiciones como reemplazo parcial del CPN, la eficiencia del cemento aumenta y esta mejora se mantiene luego de la exposición a alta temperatura. En principio, los contenidos adicionales de silicato de calcio no parecen incidir en una medida apreciable en el comportamiento a alta temperatura. Sin embargo, el polvo calizo mostró las mejores capacidades para reducir la sensibilidad

del hormigón a altas temperaturas, atribuido precisamente a su falta de actividad puzolánica. Sin embargo, en términos de rendimiento, los hormigones con escoria y puzolana natural conservan mejores niveles de rendimiento que los hormigones con caliza y patrón aún luego del efecto de la temperatura.

- Por lo tanto, las adiciones no modifican sustancialmente el comportamiento del hormigón expuesto a altas temperaturas, pero los beneficios relativos que ofrecen en comparación con el hormigón patrón antes del calentamiento (aumento en el rendimiento del cemento en todos los casos y mejoras en la resistencia, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de pulso ultrasónico en algunos casos), se conservan luego del deterioro por temperatura.

REFERENCIAS

- Anwar Hossain, K. M., (2006) High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures. *Cement & Concrete Composites* (28), 535–545.
- Donatello, S., Kuenzel, C., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., (2014) High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste. *Cement & Concrete Composites* (45), 234–242.
- El-Hawary, M., Ahmed, M. (2017). Properties, sustainability and elevated temperature behavior of concrete containing Portland limestone cement. AIP Conference Proceedings 1885,
- Gawin, D., Pasavento, F., Guerrero Castels, A., (2018) On reliable predicting risk and nature of thermal spalling in heated concrete. *Archives of civil and mechanical engineering*, (18), 1219-1227.
- Majorana, C.E., Salomoni, V.A., Mazzuco, G., Khoury, G.A., (2010) An approach for modelling concrete spalling in finite strains. *Mathematics and computers in simulations*, (80), 1694-1712.
- Mehta, P. K., Monteiro, P.J.M. (1998) *Concrete: estructura, propiedades y materiales.*, Instituto mexicano del cemento y del concreto. México: IMCYC
- Newman, J., Choo, B. S. (2003) *Advanced concrete technology*. Elsevier.
- Seleem, H. H., Rashad, A. M., Elsokary, T. (2011) Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete. *Construction and Building Materials*, (25), 1009–1017.
- Smith, F.P. (1991) Concrete spalling: controlled fire tests and review. *Journal of the Forensic Science Society*. (31), 67-75.
- Tropea, I., Villagrán-Zaccardi, Y.A., Di Maio, A.A. (2014) Secado del hormigón evaluado mediante la frecuencia de resonancia por impacto y la velocidad de pulso ultrasónico, *VI Congreso Internacional y 20ª Reunión Técnica de la AATH*. Concordia, Argentina, 215-222.
- Van der Heidjen, G.H.A., Pel, L., Adan, O.C.G. (2012) Fire spalling of concrete, as studied by NMR. *Cement and concrete research*, (42), 265-271.
- Wang, H. Y. (2008) The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cement & Concrete Composites*, (30), 992–999.