



e-ISSN 2588-0721
DOI: [10.33936/riemat.v11i2.7729](https://doi.org/10.33936/riemat.v11i2.7729)

RIEMAT

Página web de la revista: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat>



Artículo Original

Influencia de la activación térmica de la zeolita en las propiedades de los hormigones

Influence of thermal activation of zeolite on the properties of concrete

Ivette Freire-Valverde ^a, René Antonio Puig-Martínez ^{b*}, Sheila Monteserín-Pérez ^b, Giovany Alemán-Carmenate ^b, José Carlos Pérez-Brown ^b

^a Empresa de Construcción y Montaje de Mariel, Artemisa, Cuba.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3428-7391>

^b Departamento de Construcciones y Viales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-4423>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9297-0115>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6177-2975>,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8673-3696>.

* Autor para correspondencia.

rpuig200453@gmail.com

Recibido: 23/01/2026

Aceptado: 02/05/2026

Publicado: 02/07/2026

Citacion sugerida: Freire-Valverde, I., Puig-Martínez, R., Monteserín-Pérez, S., Alemán-Carmenate, G. & Pérez-Brown, J. (2026). Influencia de la activación térmica de la zeolita en las propiedades de los hormigones. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología. RIEMAT*, 11(2), 1-15. <https://doi.org/10.33936/riemat.v.11i2.7729>

Resumen

En un artículo publicado con anterioridad en esta misma revista científica, se expusieron los resultados obtenidos con la activación térmica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita, en la provincia de La Habana, Cuba, que a temperatura de 200°C y tiempo de calcinación de 2 horas, incrementó su índice de actividad resistente con el cemento hasta un 83,8%. En el presente artículo, como continuidad de la misma investigación, se exponen los resultados obtenidos con la sustitución parcial del cemento portland por esta zeolita activada, comparando a modo de control con zeolita sin activar. Como variables independientes de la investigación se seleccionan, por un lado, la zeolita sin activar y la zeolita activada térmicamente; y por otro, el porcentaje de sustitución de cemento, en proporciones del 20% y el 25%. Se miden como variables dependientes del experimento la resistencia a compresión, la porosidad efectiva y la sorptividad. Se demuestra que con 20% de sustitución del cemento portland por zeolita activada, se incrementa la resistencia media a compresión en un 13%; disminuye la sorptividad en un 23%; y se mantiene los valores de porosidad efectiva, resultados todos que evidencian las potencialidades de la zeolita activada térmicamente en el mejoramiento de las propiedades del hormigón.

Palabras clave: zeolita, cemento portland, hormigón, activación térmica

Abstract

In a previously published article in this same scientific journal, the results obtained from the thermal activation of zeolite from the Castilla La Pita deposit in Havana Province, Cuba, were presented. At a temperature of 200°C and a calcination time of 2 hours, the cement resistance index increased to 83.8%. In this article, as a continuation of the same research, the results obtained from the partial replacement of portland cement with this activated zeolite are presented, comparing it with non-activated zeolite as a control. The independent variables of the research are non-activated zeolite and thermally activated zeolite; and the percentage of cement replacement, in proportions of 20% and 25%, are selected. The dependent variables of the experiment are compressive strength, effective porosity, and sorptivity. It is demonstrated that replacing Portland cement with activated zeolite by 20% increases the average compressive strength by 13%, reduces sorptivity by 23%, and maintains effective porosity values. These results demonstrate the potential of thermally activated zeolite in improving concrete properties.

Keywords: zeolite, portland cement, concrete, thermal activation



1. Introducción

El sector de la construcción es un pilar fundamental para el desarrollo económico y la edificación del futuro, pero a la vez, es uno de los principales contribuyentes a la sobreexplotación de los recursos naturales existentes y a la contaminación medio ambiental. El hormigón es el material de construcción más empleado, siendo considerado como el segundo más consumido en el mundo después del agua (Xiao, Qiang, Nanni & Zhang, 2017). Algunos estudios demuestran que anualmente son producidos 14 mil millones de metros cúbicos de hormigón (López Dóriga, 2021). En su elaboración se emplea como material aglomerante el cemento portland, que se sustenta en la producción del conocido clínker, generador de gases contaminantes de efecto invernadero y alto consumidor de combustible fósil. A la vez, el cemento portland es la más cara de las materias primas empleadas en la elaboración del hormigón. Por eso, cualquier proceder que contribuya al ahorro de cemento, sin afectar las propiedades del hormigón, es bien recibido por la comunidad científica (Fragoso & Visbal, 2021).

Los materiales puzolánicos son adiciones activas que pueden emplearse en la solución del problema anteriormente planteado, dada su capacidad de atrapar la cal libre que queda en el clínker después del proceso de mezclado e hidratación del cemento. Para reducir su consumo en la producción de hormigones, un cierto porcentaje de este material puede ser sustituido por puzolanas, también conocidas con la denominación de materiales cementantes suplementarios. Las puzolanas, al mezclarse con el hidróxido de calcio que produce el cemento en las etapas iniciales de hidratación, siempre en presencia de agua, forman compuestos resistentes en forma de aluminatos y silicatos cálcicos hidratados, similares a los producidos por el cemento y que dan resistencia al hormigón, pero en un tiempo algo más retardado (Valdés Uribe, 2019; Fragoso & Visbal, 2021; Becerra y Rojas, 2022).

Las puzolanas pueden ser de origen natural o artificial. Entre las naturales se encuentran minerales de origen volcánico, clástico o mixtos; y las artificiales, por lo general obtenidas de desechos industriales o agrícolas. La zeolita es uno de los tipos de materiales cementantes suplementarios naturales más extendidos a nivel mundial (Becerra y Rojas, 2022; Yarra, et al., 2025). Países como Estados Unidos de América, China, Japón, Jordania, Corea, Eslovaquia, Turquía, Cuba y Nueva Zelanda, han realizado investigaciones y han desarrollado normativas que promueven el uso de zeolitas como materiales cementantes suplementarios (Puig, et al., 2025). Sobre la base que las mismas, aportan beneficios, tanto al hormigón como al medio ambiente (Ulloa, et al., 2022; Alexa, et al., 2023; Feijoo, et al., 2024; Stephen, Aigbavboa & Oke, 2025).

En Cuba, la utilización de zeolitas en la producción de hormigones ha sido objeto de algunas investigaciones. El país posee reservas de zeolitas y capacidad industrial para el procesamiento de las mismas, lo que permite acceder a sus diversas aplicaciones. Los yacimientos más conocidos son San Andrés, ubicado en la provincia de Holguín; Najasa, ubicado en la oriental provincia de Camagüey; Tasajeras, que se encuentra en Villa Clara; y Castilla La Pita, lugar de donde proviene la zeolita que se emplea en esta investigación (Santiago, 2017; Costafreda, et al., 2018; Puig, et al., 2025).

Tanto en Cuba como en el extranjero, las investigaciones han demostrado que la zeolita mejora la regulación térmica, la purificación del aire y la captura de carbono de los materiales (Stephen, Aigbavboa & Oke, 2025). En el campo del hormigón y los morteros, tiene influencia en la trabajabilidad y tiempos de fraguado e influye positivamente en la durabilidad del hormigón, aunque algunos autores consideran que disminuye en algo la resistencia a flexión y compresión a 28 días (Alexa, et al., 2023). En otra de las investigaciones se llega a sustituir hasta un 50% de cemento portland por zeolita, obteniendo resultados satisfactorios (Feijoo, et al., 2024). El uso de zeolitas para sintetizar compuestos geopoliméricos, como pastas de cemento portland, morteros y hormigones, ha despertado gran interés en los últimos años por parte de investigadores que buscan sustituir parcial o totalmente el uso del cemento portland ordinario (Ulloa, et al., 2022). Estas investigaciones demuestran la factibilidad de empleo de zeolitas en la producción de morteros y hormigones.

En el artículo denominado “Influencia de la activación térmica de la zeolita en sus propiedades cementantes” (Puig, et al., 2025), publicado en la Revista RIEMAT, se muestra como un novedoso procedimiento la activación térmica de las zeolitas tendentes al mejoramiento de las propiedades cementantes de las mismas. Se plantea que la activación térmica es un método esencial para transformar las rocas volcánicas, como las zeolitas, en un material con mejores cualidades para fabricar hormigones resistentes y sostenibles. Este proceso, conocido también como calcinación, consiste en aplicar calor intenso a la roca para eliminar el agua que contiene en su estructura y modificar su forma interna, lo que la vuelve más reactiva al mezclarse con el

cemento. En el artículo mencionado se recogen experiencias de la comunidad científica sobre la activación térmica de zeolitas, como las expuestas por Kukobat, et al. (2022) en que la zeolita se trata térmicamente a temperaturas entre 378°C y 1073°C, mejorando sensiblemente sus propiedades. O las planteadas por Kuldeyev, et al. (2023), que demuestran que las zeolitas naturales activadas térmicamente a 550°C durante 2 h de calcinación, pueden utilizarse para purificar agua contaminada. También los estudios de Guerra Gonzales, et al. (2021), que demuestran la influencia de la temperatura y tiempo de activación térmica en la solubilidad alcalina de zeolitas.

Sobre la base de estos presupuestos, en el Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, se desarrolló una investigación dirigida a evaluar las potencialidades de la activación térmica de las zeolitas provenientes del yacimiento Castilla La Pita, en la provincia de La Habana, Cuba. La primera parte de la investigación, ya publicada (Puig, et al., 2025), estuvo dirigida a evaluar la influencia de la activación térmica de la zeolita en sus propiedades cementantes. Los resultados de esta parte de la investigación concluyeron que, la activación térmica incrementa las propiedades cementantes de la zeolita estudiada, obteniendo el mayor índice de actividad resistente con el cemento a temperatura de 200°C y tiempo de calcinación de 2 horas.

Como parte de la misma investigación, en el presente artículo se evalúa la influencia en la resistencia a compresión, porosidad efectiva y sorptividad en los hormigones, del empleo de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita activada térmicamente, a la temperatura y tiempo de calcinación anteriormente mencionados, como adición activa en sustitución parcial del cemento portland.

2. Materiales y Métodos

En base a los objetivos previstos, la investigación está dirigida a evaluar, para la combinación óptima de tiempo y temperatura, propiedades del hormigón.

2.1. Diseño experimental

El experimento se basa en evaluar el comportamiento de probetas de hormigón con adiciones de zeolita activada a temperatura de 200°C y tiempo de calcinación de 2 h, comparando con probetas elaboradas con zeolita sin activar.

Se decide diseñar un experimento factorial simple, en este caso con dos variables independientes. La primera, obvia: empleo de zeolita sin activar y activada térmicamente para los rangos de temperatura y tiempo óptimos; la segunda variable independiente, la proporción de zeolita empleada en sustitución de cemento portland. Para esta última variable, se deciden tomar dos niveles en correspondencia con los resultados de la evaluación del estado del arte (Fragoso & Visbal, 2021; Becerra & Rojas, 2022; Alexa et al., 2023), en que los mejores resultados se han obtenido con porcentajes de sustitución entre 15% y 30%. Por tanto, para la variable independiente “proporción de zeolita” se decide tomar 20% y 25%. Este análisis establece cuatro dosificaciones: dos de control con zeolita sin activar y dos de prueba con zeolita activada; o sea, para cada uno de los porcentajes de sustitución (20% y 25%), dos dosificaciones, una con zeolita activada y otra de control con zeolita sin activar.

Como variables dependientes a evaluar: resistencia a compresión, porosidad efectiva y sorptividad. Como constantes, la materia prima empleada y la resistencia media a compresión en este caso, 20 MPa.

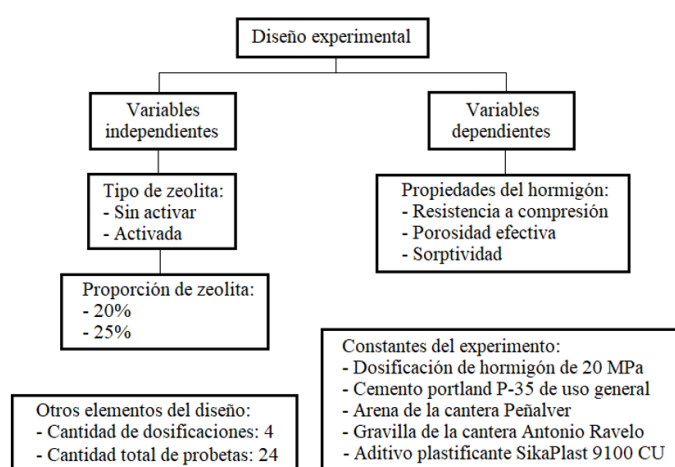
Para la determinación de las propiedades del hormigón se elaboraron probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, confeccionadas en correspondencia con la norma cubana NC ISO 1920-3, mantenidas en régimen de curado hasta edad de 28 días. De cada dosificación se confeccionaron seis probetas: tres para ensayos de resistencia a compresión; una para el ensayo de porosidad efectiva; una para el ensayo de sorptividad; y una de reserva. En total, para las cuatro dosificaciones, 24 probetas. Esta población permite tener, de cada dosificación, tres resultados de resistencia a compresión; además, con cada una de las probetas destinadas a ensayos de porosidad efectiva y sorptividad, se obtienen tres lascas experimentales. Con ello se cumple la base normativa necesaria para la experimentación. La Figura 1 resume el experimento a realizar.

En el tratamiento estadístico de los resultados del experimento, se empleó el programa Statgraphics Centurion, versión XIX. Para la evaluación estadística se tomaron los valores medios de cada variable

dependiente evaluada para cada una de las combinaciones experimentales. Mediante un análisis de varianza se evalúa la significancia de la temperatura y tiempo de calcinación óptimos sobre las variables, para lo que se determinan los valores P de la prueba F de Fisher. Si ocurre que el valor P es menor que 0,05, indica que tanto la temperatura como el tiempo de calcinación tienen un efecto estadísticamente significativo sobre las variables con un 95% de confianza. Si se constata la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las alternativas sin calcinar y calcinadas, se procede a realizar la prueba de rangos múltiples a través del método LSD, con un 95% de confianza, evaluando la existencia o no de grupos homogéneos que permitan confirmar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas en cada combinación. Por último, a través del propio programa, se elabora el gráfico de medias para comparar, con un nivel de confianza del 95%, las diferencias entre las variables con zeolita sin activar y activada térmicamente

Figura 1.

Disiño experimental.



2.2. Caracterización de la materia prima

En el experimento se emplean probetas de hormigón de cemento portland. Además del cemento y la zeolita micronizada y activada térmicamente a temperatura y tiempo de calcinación óptimos, en su elaboración se emplea, como pudo apreciarse en la Figura 1, arena de la cantera “Peñalver”, ubicada en la provincia de La Habana, gravilla de la cantera “Antonio Ravelo”, de la provincia de Artemisa y aditivo superfluidificante SikaPlast 9100CU, reductor de agua de rango medio de alta eficiencia y con permanencia de trabajabilidad.

2.2.1 Cemento portland de uso general P-35

El cemento utilizado en la investigación es tipo P-35, procedente de la fábrica “Curazao SA” del municipio Mariel, provincia de Artemisa, Cuba. Es un cemento clasificado como puro, de uso general, y en la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos realizados a este material en el propio laboratorio del CECAT, así como el cumplimiento de las especificaciones establecidas según la norma cubana NC 1340.

Puede apreciarse que el cemento utilizado cumple todas las especificaciones normadas.

2.2.2. Zeolita

La zeolita, en su estado inicial, se obtiene de la cantera Castilla La Pita, apreciándose en la Figura 2 una foto tal como se extrae del terreno. Una vez transportada al laboratorio del CECAT, se inicia su procesamiento con la trituración, empleando para ello una trituradora de mandíbulas. El objetivo de esta primera trituración es reducir el tamaño de las rocas en fragmentos más pequeños. Posteriormente, el material triturado se somete a un proceso de secado en una estufa industrial, manteniendo una temperatura constante entre 105°C y 110°C durante 24 horas. Se ca la zeolita, se muele en la máquina de Los Ángeles hasta obtener un polvo de granulometría fina. Para asegurar la uniformidad del material, el producto resultante se tamiza, utilizando

en el experimento únicamente las partículas que pasan el tamiz número 50. Este polvo micronizado, libre de impurezas y con un tamaño de partícula controlado, es el componente a activar térmicamente.

Tabla 1.

Cumplimiento de las especificaciones normadas para cemento.

Propiedad	Unidad de medida	Parámetros	
		Reales	Normados
Superficie específica	cm ² /g	3317	>2800
Peso específico	g/cm ³	3,1	3,1 a 3,15
Densidad	g/cm ³	1,15	-
Consistencia normal	%	24,9	-
Tiempo de fraguado inicial	Min	95	>45
Tiempo de fraguado final	h	3	<10
Resistencia a compresión	3 días	MPa	>17
	7 días	MPa	>25
	28 días	MPa	>35

Figura 2.

Zeolita recién extraída del yacimiento Castilla La Pita.



Las propiedades mineralógicas y químicas de la zeolita pueden apreciarse respectivamente en las Tablas 2 y 3 (Puig, et al., 2025).

Tabla 2.

Composición mineralógica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita (Puig, et al., 2025).

Composición mineralógica	
Componente principal	Clinoptilolita
Otros componentes	Cuarzo < 1 %, Montmorillonita < 1 %
Coloración	Verde grisáceo claro
Dureza de MOHS	Alrededor de 4

Tabla 3.

Composición química de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita (Puig, et al., 2025).

Porcientos de óxidos en peso									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Otros
56,99	13,30	3,66	1,79	2,31	5,02	2,15	1,51	12,73	0,54

Al comparar esta composición y propiedades con los requisitos especificados en la norma cubana NC TS 528, se llega a la conclusión que el material extraído del yacimiento Castilla La Pita cumple las especificaciones establecidas para una puzolana tipo N. Su peso específico real, determinado en el laboratorio el CECAT, fue de 2,34 g/cm³.

La activación térmica se realizó sometiendo las muestras de zeolita ya micronizada a temperatura de 200°C y tiempo de calcinación de 2 h. En la Figura 3 se puede apreciar una foto de la mufla utilizada en el proceso de calcinación.

Figura 3.

Mufla de laboratorio marca Thermo Scientific-FD1530M.



Según los resultados de la activación térmica ya publicados (Puig, et al., 2025), el índice de actividad resistente con el cemento, obtenido a temperatura de 200°C y tiempo de calcinación de 2 h, es de un 83,8%, superior al mínimo especificado en la norma cubana NC TS 528, así como en normas internacionales similares, de un 75%.

2.2.3. Agregados empleados

Tanto la arena como la gravilla empleada en el experimento, fueron caracterizados en el laboratorio del CECAT, siendo sus propiedades las mostradas en la Tabla 4. En la propia tabla puede apreciarse el cumplimiento de las especificaciones establecidas en la norma cubana NC 251.

Puede apreciarse que los dos áridos empleados poseen calidad, cumpliendo todas las especificaciones establecidas, lo que contribuye a evitar influencias físicas negativas en las propiedades del hormigón. Granulométricamente también cumplen, clasificando el árido fino como una arena con límites de fracción nominal 5-0,15; y el árido grueso como una gravilla con límites de fracción 19-10.

2.2.4. Aditivo superfluidificante SikaPlast 9100CU

Es un aditivo reductor de agua de rango medio de alta eficiencia y con permanencia de trabajabilidad, libre de

cloruros, que, de acuerdo con la certificación ofrecida por el fabricante, cumple con todas las especificaciones de la norma cubana NC 228, clasificando como un aditivo superplastificante.

Tabla 4.

Propiedades de los áridos empleados en el experimento.

Propiedad	Unidad de medida	Parámetros			
		Arena "Peñalver"		Gravilla "A. Ravelo"	
		Real	Normado	Real	Normado
Peso específico corriente	g/cm ³	2,57	≥ 2,5	2,54	≥ 2,5
Peso específico saturado	g/cm ³	2,63	-	2,53	-
Peso específico aparente	g/cm ³	2,72	-	2,6	-
Peso unitario suelto	g/cm ³	1548	-	1276	-
Peso unitario compactado	g/cm ³	1710	-	1450	-
Absorción	%	2,08	≤ 3	2,7	≤ 3
Material más fino que el tamiz 200	%	4,60	≤ 5	0,8	≤ 1
Partículas de arcilla	%	0,92	≤ 1	0,07	≤ 0,25
Huecos	%	33,52	-	41,3	-
Equivalente de arena	%	92	> 70	-	-
Módulo de finura	-	2,78	2,2 a 3,58	-	-
Partículas planas y alargadas	%			4,7	≤ 10

2.3. Dosificaciones empleadas y confección de las probetas

La dosificación del hormigón se efectuó por el procedimiento del ACI (ACI 211.1-91, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete), uno de los más utilizados en el área geográfica del continente americano, y adecuado a las condiciones de Cuba, en particular, al proporcionar los áridos, en este caso por el procedimiento de vacío mínimo. Se diseñó un hormigón de 20 MPa de resistencia media a compresión y nivel medio de agresividad medioambiental. Una vez efectuados los ajustes por humedad de los áridos y mezclas de prueba para obtener la laborabilidad del hormigón en estado fresco correspondiente a un hormigón de consistencia fluida, se prepararon las cuatro amasadas de 12 litros, suficiente para confeccionar las seis probetas previstas para cada una según diseño experimental: dos de control con sustitución de 20% y 25% de zeolita sin activar; y las otras dos, también con 20% y 25% de sustitución, pero en este caso de zeolita activada térmicamente. En la Tabla 5 se pueden apreciar las masas de materiales para la dosificación original sin zeolita y para las mezclas con sustitución de cemento por zeolita en los dos porcentajes de sustitución.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resistencia a compresión

El ensayo se realizó a la edad de 28 días, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 6. Estos resultados físicos de resistencia media a compresión muestran que, para 20% de sustitución, este parámetro se incrementa en un 13% con la zeolita activada térmicamente respecto a la zeolita sin activar. Sin embargo, para un 25% de sustitución decrece en un 3%, aunque alcanza magnitud superior al obtenido con 20% de sustitución. Como los porcentajes de incremento o disminución no son elevados, la respuesta hay que complementarla con análisis estadísticos que muestren la existencia o no de diferencias significativas entre las medias.

Tabla 5.

Masas de materiales necesarios para las amasadas de 12 L.

Materiales	Unidad de medida	Dosificación original sin zeolita	Sustitución	
			20%	25%
Cemento	Kg	4,78	3,82	3,58
Zeolita	Kg	-	0,96	1,19
Arena "Peñalver"	Kg	10,69	10,69	10,69
Gravilla "Antonio Ravelo"	Kg	10,61	10,61	10,61
Agua	L	2,29	2,29	2,29
Aditivo SikaPlast 9100CU	g	51,4	58,6	61,2

Con cada amasada se confeccionaron las seis probetas cumpliendo las especificaciones de la norma cubana NC ISO 1920-3, manteniéndolas en régimen de curado durante 28 días. En la Figura 4 se aprecian las probetas confeccionadas, ya colocadas en el tanque de curado.

Figura 4.

Probetas en el tanque de curado.



Tabla 6.

Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

Dosificaciones	Resistencia a compresión, MPa			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
20% zeolita natural	22,98	23,64	23,74	23,45
25% zeolita natural	24,34	31,62	32,26	29,41
20% zeolita activada	25,73	21,06	32,38	26,39
25% zeolita activada	28,83	32,68	23,82	28,44

Para el procesamiento estadístico de los resultados se empleó el programa Statgraphics Centurion. La Tabla 7 muestra los resultados del análisis de varianza (Tabla ANOVA), donde se puede apreciar que el valor P de la prueba F es mayor a 0,05, lo que indica que la sustitución parcial de cemento por zeolita activada térmicamente no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas, a pesar de existir un leve incremento físico en la prueba con sustitución de 20%.

Tabla 7.

Análisis de varianza para la resistencia a compresión.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	55,6374	3	18,5458	1,04	0,4263
Intra grupos	142,878	8	17,8597		
Total (Corregido)	198,515	11			

Confirmado lo anterior corresponde efectuar la prueba de rangos múltiples a través del método LSD, con un 95 % de confianza, para identificar la existencia de grupos homogéneos. Los resultados se observan en la Tabla 8. Puede apreciarse claramente la existencia de un solo grupo homogéneo, lo que significa que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten la misma columna. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método queda un riesgo mínimo del 5% para que cada par de medias sea significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. En la Figura 5, en el gráfico de medias, se ratifica este comportamiento.

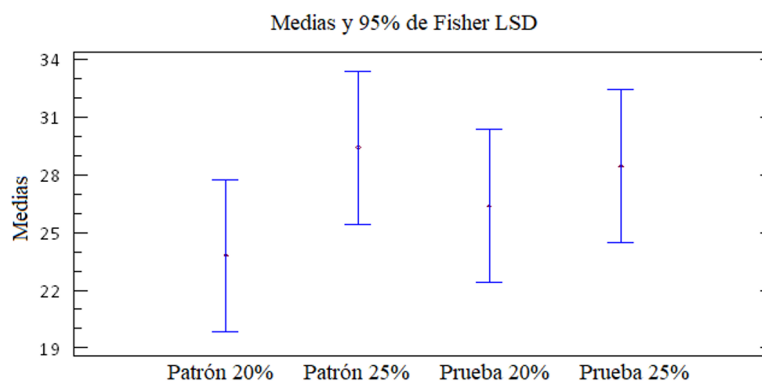
Tabla 8.

Prueba de múltiples rangos para la resistencia a compresión.

Dosificaciones	Casos	Media	Grupos homogéneos
20% zeolita natural	3	23,4481	X
25% zeolita natural	3	29,41	X
20% zeolita activada	3	26,3886	X
25% zeolita activada	3	28,4433	X

Figura 5.

Gráfico de medias para la resistencia a compresión.



En esta propiedad se puede llegar entonces a la conclusión que, con 20% de sustitución de zeolita sin activar por zeolita activada, físicamente se aprecia un incremento del 13% en la resistencia media a compresión, lo que evidencia que para este porcentaje de sustitución la activación térmica cumple su cometido. Esto no ocurre con 25% de sustitución, con un decrecimiento del 3%. Sin embargo, en la evaluación estadística no existen diferencias significativas entre las diferentes dosificaciones lo que puede deberse a la reducida cantidad de especímenes empleados en el experimento.

3.2. Porosidad efectiva

La porosidad efectiva del hormigón brinda criterios del volumen de poros que quedan en la pasta endurecida después del proceso de hidratación del cemento portland, por lo que se regula un límite máximo de acuerdo con las condiciones de agresividad medio ambiental. Para el experimento, una de las probetas confeccionada con cada dosificación se cortó en lascas de 3 cm de espesor cubriendo sus laterales con parafina, y colocando tres de ellas en un lecho de agua tal como establece la norma cubana NC 345. Los resultados del ensayo de porosidad efectiva pueden ser apreciados en la Tabla 9.

Tabla 9.

Resultados del ensayo de porosidad efectiva.

Dosificaciones	Porosidad efectiva, %			
	Lasca 1	Lasca 2	Lasca 3	Promedio
20% zeolita natural	8,42	8,21	8,43	8,35
25% zeolita natural	9,31	9,88	9,71	9,63
20% zeolita activada	8,38	8,43	8,54	8,45
25% zeolita activada	8,88	8,57	8,47	8,64

Se puede apreciar que, tanto en las lascas obtenidas de las probetas, como en el valor promedio de porosidad efectiva, no se llega a superar el 10%, límite máximo permisible según la norma cubana NC-120, lo que es un resultado positivo. Con el 20% de sustitución, la porosidad efectiva de la dosificación con zeolita activada térmicamente, se incrementa en un 1% respecto a la zeolita sin activar. Pero para un 25% de sustitución, ocurre una disminución del 10% respecto a la adición de zeolita sin activar. Quiere decir que, físicamente, la sustitución de un 25% de zeolita activada logra disminuir la porosidad efectiva del hormigón en un valor significativo: el hormigón es menos poroso, tiene menor volumen de poros capilares.

De todas maneras, se procede con el análisis de varianza que se muestra en la Tabla 10, en la que se puede apreciar que el valor P de la prueba F, aquí también es mayor a 0,05, lo que indica que estadísticamente no hay diferencias significativas entre las medias.

Tabla 10.

Análisis de varianza para la porosidad efectiva.

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,68527	3	0,895	0,71	0,5720
Intra grupos	10,0665	8	1,25832		
Total (Corregido)	12,7518	11			

Confirmado lo anterior, corresponde efectuar la prueba de rangos múltiples a través del método LSD, con un 95 % de confianza, para identificar los diferentes grupos homogéneos. Los resultados se observan en la Tabla 11. En ella puede apreciarse la existencia de un solo grupo homogéneo, avalado además por el gráfico de medias mostrado en la Figura 6.

Con la evaluación de la porosidad efectiva se llega a la conclusión que, para un 25% de sustitución de zeolita sin activar por zeolita activada, se logra descender la porosidad efectiva en un 10%, lo que significa que, para este porcentaje de sustitución, la activación térmica cumple su cometido, logrando a edad de 28 días un mejor sellaje de los poros capilares que el obtenido con la zeolita sin activar. Para un 20% de sustitución, se eleva algo la porosidad efectiva, pero en rango no significativo.

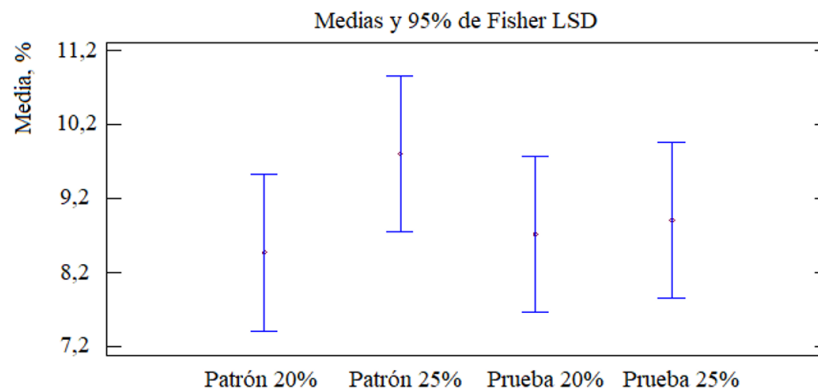
Tabla 11.

Prueba de múltiples rangos para la porosidad efectiva.

Dosificaciones	Casos	Media	Grupos homogéneos
20% zeolita natural	3	8,35	X
25% zeolita natural	3	9,63	X
20% zeolita activada	3	8,45	X
25% zeolita activada	3	8,64	X

Figura 6.

Gráfico de medias para la porosidad efectiva.



3.3. Velocidad de absorción (sorptividad)

A diferencia de la porosidad efectiva, la sorptividad mide la tortuosidad e interconexión entre los poros capilares que se generan en el proceso de hidratación del cemento. Para el experimento, la quinta probeta de cada dosificación fue perforada con un extractor de testigos, serrada en lascas de 5 cm, que luego de preparadas se colocaron sobre un lecho de agua, midiendo el incremento de la masa en el tiempo. En la Tabla 12 se pueden apreciar los resultados del ensayo de sorptividad.

Tabla 12.

Resultados del ensayo de velocidad de absorción (sorptividad).

Dosificaciones	Sorptividad, mm/s ^{1/2}			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
20% zeolita natural	1,64 x 10 ⁻⁵	1,95 x 10 ⁻⁵	2,05 x 10 ⁻⁵	1,88 x 10 ⁻⁵
25% zeolita natural	2,04 x 10 ⁻⁵	2,21 x 10 ⁻⁵	2,14 x 10 ⁻⁵	2,13 x 10 ⁻⁵
20% zeolita activada	1,56 x 10 ⁻⁵	1,38 x 10 ⁻⁵	1,41 x 10 ⁻⁵	1,45 x 10 ⁻⁵
25% zeolita activada	2,01 x 10 ⁻⁵	1,87 x 10 ⁻⁵	1,91 x 10 ⁻⁵	1,93 x 10 ⁻⁵

Puede apreciarse que ninguno de los valores obtenidos supera el máximo establecido por la norma cubana NC 120 de 5×10^{-5} mm/s^{1/2} para un nivel de agresividad alto, lo que indica la influencia positiva que tiene la zeolita como material cementante suplementario en la disminución de la sorptividad. Pero, además, tanto con 20% como con 25% de sustitución, con zeolita activada térmicamente, los valores de sorptividad son menores que sus similares con zeolita sin activar, lo que es reflejo del incremento de las potencialidades cementantes debido al proceso de activación. Con 20% de sustitución se logra una disminución del 23%; y con 25% de sustitución se logra una disminución del 9%.

Igual que en las dos propiedades anteriores se procede a efectuar el análisis de varianza para evaluar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 13.

Tabla 13.

Análisis de varianza para la velocidad de absorción (sorptividad).

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	$6,35691 \times 10^{-9}$	3	$2,11897 \times 10^{-9}$	4,35	0,0428
Intra grupos	$3,89828 \times 10^{-9}$	8	$4,87285 \times 10^{-10}$		
Total (Corregido)	$1,02552 \times 10^{-8}$	11			

El ser el valor-P inferior a 0,05, es indicativo de la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos o intra grupos. Por tanto, para evaluar que medias son estadísticamente diferentes, se procede con la prueba de rangos múltiples, y de esa forma identificar la existencia de los diferentes grupos homogéneos. En la Tabla 14 se muestran los resultados. El gráfico de medias de la Figura 7 complementa el análisis.

Tabla 14.

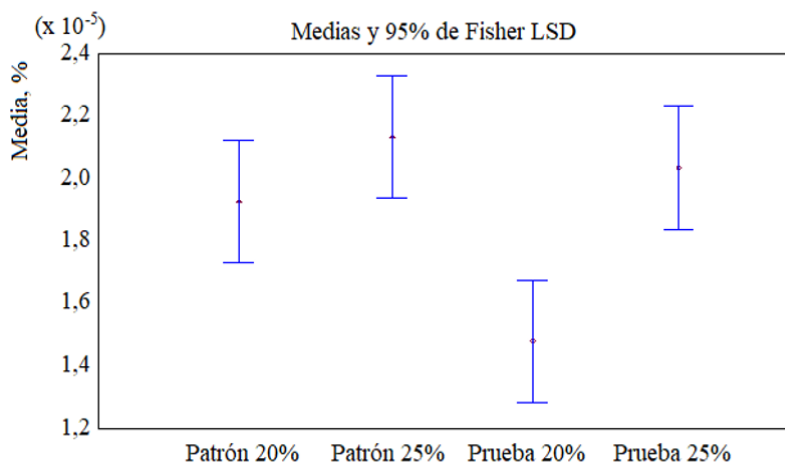
Prueba de múltiples rangos para la velocidad de absorción (sorptividad).

Dosificaciones	Casos	Media	Grupos homogéneos
20% zeolita natural	3	$1,88 \times 10^{-5}$	X
25% zeolita natural	3	$2,13 \times 10^{-5}$	X
20% zeolita activada	3	$1,45 \times 10^{-5}$	X
25% zeolita activada	3	$1,93 \times 10^{-5}$	X

Puede apreciarse claramente la existencia de dos grupos homogéneos, lo que significa que existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que no comparten una misma columna. Es importante, para entender los resultados del ensayo, constatar que se forma un grupo homogéneo con la dosificación que emplea 20% de zeolita activada, lo que corrobora que, para este nivel de sustitución, la activación térmica tiene respuesta muy positiva en la sorptividad. El otro grupo homogéneo está formado por las dosificaciones con zeolita sin activar y con sustitución de sólo el 25% de la activada térmicamente. Este resultado estadístico complementa el resultado físico obtenido en el ensayo de sorptividad, o sea, con 20% de sustitución de zeolita sin activar por zeolita activada se obtienen los mayores porcentajes de disminución de esta propiedad, lo que es reflejo de la reducción que experimenta la tortuosidad e interconexión entre poros capilares debido al efecto tardío en la reacción puzolánica de la zeolita activada térmicamente respecto a la zeolita sin activar.

Figura 7.

Gráfico de medias para la velocidad de absorción (sorptividad)



4. Conclusiones

La investigación demuestra que la activación térmica de la zeolita natural del yacimiento Castilla La Pita, tratada a temperatura de 200°C y tiempo de activación de 2 horas, confiere mejores propiedades cementantes a este material para su desempeño para hormigones (Puig, et al., 2025). Aunque tanto con 20% como con 25% de sustitución de la zeolita sin activar por zeolita activada térmicamente, los resultados en las tres propiedades medidas son satisfactorios, los mejores resultados en las propiedades del hormigón se obtienen con sustitución del 20%, incrementando los valores de resistencia media a compresión y disminuyendo la velocidad de absorción capilar, mientras la porosidad efectiva se mantiene prácticamente constante. Estos resultados son semejantes a los obtenidos con otras variantes de zeolita por Kukobat, et al. (2022) y Kuldeyev, et al. (2023), y permiten afirmar que con la activación térmica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita se puede reducir el consumo de cemento, aportando además beneficios económicos y ambientales al disminuir la huella de carbono asociada a su producción.

Los procedimientos empleados, basados en normas cubanas e internacionales, y la caracterización rigurosa de las materias primas empleadas, pueden servir de referencia metodológica para acometer investigaciones similares con otros tipos de materiales cementantes suplementarios.

Declaración de disponibilidad de datos

Los autores declaran que los datos utilizados en este estudio se encuentran descritos en el manuscrito y debidamente citados a lo largo del documento. Asimismo, las fuentes de los datos están disponibles en la sección de referencias, con el fin de garantizar la transparencia y la reproducibilidad de los resultados.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa con el fin de apoyar la mejora de la redacción, el estilo del texto y la organización de algunas secciones del documento. Estas herramientas fueron empleadas únicamente como asistencia en el proceso de elaboración del manuscrito.

Posteriormente, los autores revisaron cuidadosamente todo el contenido generado o sugerido por dichas herramientas, realizaron las correcciones pertinentes y validaron la información presentada para asegurar su precisión, coherencia académica y rigor científico. Los autores asumen la responsabilidad total por el contenido final del manuscrito.

Declaración de contribución de los autores CRediT

Ivette Freire-Valverde: conceptualización, metodología, revisión de los resultados, análisis e interpretación de datos, redacción del original. **René Antonio Puig-Martínez:** conceptualización, metodología, análisis estadístico de resultados, redacción de variante definitiva. **Sheila Monteserín-Pérez:** revisión bibliográfica, investigación, análisis estadístico de resultados, redacción del original. **Giovany Alemán-Carmenate:** Investigación. **José Carlos Pérez-Brown:** Investigación.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no tiene ningún interés financiero ni relación personal que pudiera influir en el trabajo descrito en este artículo.

5. Referencias

Alexa Stratulat, S. M., Olteanu, I., Toma. A. M., Pastia, C., Banu, O. M., Corbu, O. C. & Toma, I. O. (2023). The Use of Natural Zeolites in Cement-Based Construction Materials—A State of the Art Review. *Journals Coatings*. 14(1), 18. <https://doi.org/10.3390/coatings14010018>

- Becerra Duitama, J. A. & Rojas Avellaneda, D. (2022). Pozzolans: A review. *Engineering and Applied Science Research*, 49(4), 495-504. Retrieved from: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/247697>
- Costafreda Mustelier, J. L., Martín Sánchez, D. A., Rosell Lam, M. B. & Costafreda Velázquez, J. L. (2018). Las zeolitas naturales de Cuba. *Las zeolitas naturales de Iberoamérica*. Universidad Politécnica de Madrid, España. pp. 190-215. Disponible en: https://oa.upm.es/50784/1/zeolitas_Cuba.pdf
- Feijoo Calle, E. P., Feijoo Guevara, B. A. & Vásquez Álvarez, P. E. (2024). La zeolita como mineral asociado al cemento en morteros. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 28(122), 53-61 <https://doi.org/10.47460/uct.v28i122.765>
- Fragoso Doria, J. A. & Visbal Jacome, J. E. (2021). *El uso de la puzolana de origen natural en concreto hidráulico*. Tesis en opción al grado de Ingeniero Civil. Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia. <http://dx.doi.org/10.57799/11227/7710>
- Guerra Gonzáles, Y., Crespo Caballero, M., Guardiola Romero, R. L., Leyva Rodríguez, C. A. & Almenares Reyes, R. S. (2021). Influencia de la temperatura y tiempo de activación térmica en la solubilidad alcalina de las zeolitas del yacimiento Caimanes. *Tecnología Química*. 41(3), 638-657. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sciarttext&pid=S2224-61852021000300638>
- Kukobat, R., Škrbić, R., Massiani, P., Baghdad, K., Launay, F., Sarno, M., Cirillo, C., Senatore, A., Salčin, E. & Gotovac Atlagić, S. (2022). Thermal and structural stability of microporous natural clinoptilolite zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 341, 112101. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2022.112101>
- Kuldeyev, E., Seitzhanova, M. Tanirbergenova, S., Tazhu, K., Doszhanov, E., Mansurov, Z., Azat, S., Nurlybaev, R. & Berndtsson, R. (2023). Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption. *Water*. 15(12), 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>
- López Dóriga, J. (2021). El hormigón produce tanta contaminación como lo hacen China y Estados Unidos. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/el-hormigon-produce-tanta-contaminacion-como-lo-hacen-china-y-estados-unidos>
- Puig Martínez, R. A., Freire Valverde, I., Montesión Pérez, S., Alemán Carmenate, G. & Pérez Brown, J. C. (2025). Influencia de la activación térmica de la zeolita en sus propiedades cementantes. *Revista Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*. 10(1), 45-55. <https://doi.org/10.33936/riemat.v10i1.7654>
- Santiago, F. (2017). La creación de la industria cubana de zeolitas naturales: un caso de universidad emprendedora. Vinculación academia-industria para fortalecer los sistemas nacionales de innovación: experiencias de Cuba, México y Costa Rica. Editora Universidad de La Habana, Cuba, ISBN 978-959-7251-02-6. pp. 123-151. Disponible en: https://www.academia.edu/34252673/La_creaci%C3%B3n_de_la_industria_cubana_de_zeolitas_naturales_un_caso_de_universidad_emprendedora
- Stephen, S., Aigbavboa, C. & Oke A. (2025). Revolutionising Green Construction: Harnessing Zeolite and AI-Driven Initiatives for Net-Zero and Climate-Adaptive Buildings. *Buildings*. 15(6), 885. <https://doi.org/10.3390/buildings15060885>
- Ulloa, N., Jiménez, M., Serrano, B. & Serrano, C. (2022). Geopolímeros basados en zeolitas naturales como una alternativa de materiales de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*. 37(1), 5-13. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732022000100005
- Valdés Uribe, J. D. (2019). Desempeño de materiales cementantes suplementarios en resistencia a compresión e hidratación en pastas de cemento. Tesis de grado. Universidad de Santo Tomás, Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/18035>
- Xiao, J., Qiang, C., Nanni A. & Zhang, K. J. C. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*. 155, 1101-1111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.130>

Yarra, A., Nakkeeran, G., Roy, D. & Uwadiogwu Alaneme, G. (2025). Evaluation of SCBA-replaced cement for carbon credits and reduction in CO₂ emissions. *Springer Nature*, 7(114), <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-025-06487-3>