



Influencia de la activación térmica de la zeolita en sus propiedades cementantes

Influence of thermal activation of zeolite on their cementing properties

Autores

René Antonio Puig Martínez ¹ *

<https://orcid.org/0000-0001-9025-4423>

Ivette Freire Valverde ²

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

Sheila Monteserín Pérez ¹

<https://orcid.org/0009-0004-9297-0115>

Giovany Alemán Carmenate ¹

<https://orcid.org/0009-0008-6177-2975>

José Carlos Pérez Brown ¹

<https://orcid.org/0009-0002-8673-3696>

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Construcciones y Viales, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

² Empresa de Construcción y Montaje de Mariel, Artemisa, Cuba

* Autor para correspondencia.

rpuig200453@gmail.com

Citacion sugerida: Puig, R., Freire, I., Monteserín, S., Alemán, G. & Pérez, J. (2025). Influencia de la activación térmica de la zeolita en sus propiedades cementantes. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología. RIEMAT*, 10(1), pp. 45-55 <https://doi.org/10.33936/riemat.v10i1.7654>

Recibido: 02/06/2025

Aceptado: 09/06/2025

Publicado: 26/06/2025

Resumen

Las zeolitas son materiales puzolánicos ricos en sílice, que han despertado el interés en la comunidad científica, debido a su propiedad de reaccionar con la portlandita del cemento en presencia de agua. Tradicionalmente, se utilizan extraídas de los yacimientos bajo un proceso de limpieza y trituración; pero, en los últimos años, se ha comprobado que pueden incrementar sus propiedades cementantes, cuando son sometidos previamente a elevadas temperaturas, lo que se conoce como activación térmica. Con este presupuesto, el objetivo de la investigación es evaluar cómo la activación térmica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita, en la provincia de La Habana, Cuba, influye en sus propiedades cementantes. Para ello se sometió la zeolita a un proceso de activación térmica a temperaturas de 200°C, 400°C y 600°C con tiempos de calcinación de una, dos y tres horas, elaborando briquetas de mortero, que sometidas a ensayo de resistencia a compresión se comparan con un mortero patrón elaborado con zeolita sin activar. Los resultados obtenidos muestran que, al activar térmicamente la zeolita se incrementan sus propiedades cementantes; y que, el mayor índice de actividad resistente con el cemento portland se obtiene a temperatura de 400°C y tiempo de calcinación de 2 h.

Palabras clave: zeolita; cemento portland; hormigón; activación térmica.

Abstract

Zeolites are silica-rich pozzolanic materials that have sparked interest in the scientific community due to their ability to react with portlandite in cement in the presence of water. Traditionally, they are extracted from deposits through a cleaning and grinding process; however, in recent years, it has been demonstrated that they can increase their cementing properties when previously subjected to high temperatures, known as thermal activation. With this premise, the objective of the research is to evaluate how the thermal activation of zeolite from the Castilla La Pita deposit in Havana province, Cuba, influences its cementing properties. To this end, the zeolite was subjected to a thermal activation process at temperatures of 200°C, 400°C, and 600°C with calcination times of one, two, and three hours, producing mortar briquettes. These briquettes were then subjected to compressive strength tests and compared with a standard mortar made with not activated zeolite. The results show that thermal activation of zeolite increases its cementing properties; and that the highest strength activity index with Portland cement is obtained at a temperature of 400°C and a calcination time of 2 hours.

Keywords: zeolite; portland cement; concrete; thermal activation.





1. Introducción

Las puzolanas son adiciones activas, de suma importancia en la industria del cemento por su capacidad de atrapar la cal libre que queda en el clinker después del proceso de mezclado e hidratación del hormigón, reduciendo el calor de hidratación y los costos de producción. Esto ha motivado que su uso haya ganado reconocimiento a nivel internacional, más si se tiene en cuenta su potencial para mejorar notablemente las propiedades del hormigón y reducir el impacto ambiental asociado a la industria de la construcción (Fragoso & Visbal, 2021; Becerra y Rojas, 2022).

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 puzolanas naturales como materiales cementantes suplementarios (Becerra y Rojas, 2022; Yarra et al., 2025). Los dos últimos países han hecho su aparición en las estadísticas mundiales a partir de 2014 y 2015, respectivamente. Estas iniciativas se han basado en la necesidad de promover prácticas más sostenibles en la industria de la construcción y reducir de manera considerable el consumo de cemento portland puro, cuya producción trae consigo grandes emisiones de dióxido de carbono durante todo el proceso.

En el contexto nacional de Cuba, la utilización de puzolanas naturales en la producción de hormigones ha sido objeto de interés y estudio. Cuba tiene varias reservas de yacimientos de zeolitas naturales y suficiente 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).

Está demostrado que las zeolitas en estado natural 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). Una de las investigaciones consultadas explora el papel de la zeolita en la construcción sostenible, en particular para edificios de cero emisiones netas y adaptables al clima (Stephen, Aigbavboa & Oke, 2025). En ella se realiza una revisión cuantitativa, cuantitativa y narrativa mediante análisis bibliométrico de publicaciones existentes de las bases de datos Scopus y Web of Science para identificar tendencias de investigación, contribuciones clave y avances tecnológicos. Los resultados revelaron que la zeolita mejora la regulación térmica, la purificación del aire y la captura de carbono de los materiales. Las comparaciones con estudios previos destacan la creciente adopción de estas tecnologías debido a sus beneficios ambientales y económicos.

Según Alexa et al. (2023), las zeolitas naturales tienen influencia en la trabajabilidad y tiempos de fraguado de los materiales de construcción a base de cemento portland, aunque disminuyen la resistencia a flexión y compresión de los morteros a 28 días (Petkova et al., 2024). Sin embargo, la mezcla de zeolitas con otros materiales cementantes suplementarios mejora las propiedades mecánicas de morteros y hormigones (Islam y Mohr, 2022). Además, el impacto del empleo de zeolita en la durabilidad del hormigón, sugieren una alternativa viable al empleo del cemento portland (Mohr y Islam, 2023). Feijoo et al. (2024), evalúan la resistencia a la compresión simple de probetas fabricadas con cemento y con una adición a partes iguales de zeolita. Estos investigadores llegan a sustituir hasta un 50% de cemento portland por zeolita, obteniendo resultados que deben ser considerados por los profesionales involucrados en el uso del cemento.

El uso de zeolitas naturales 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). Estos autores prepararon muestras de mortero geopolimérico a base de zeolitas naturales, en las que se evaluaron sus propiedades mecánicas a través de la resistencia a la compresión. Los resultados mostraron un incremento de esta propiedad hasta 17,3 MPa.

Las anteriores referencias demuestran la factibilidad de empleo de zeolitas en la producción de morteros y hormigones. Sin embargo, investigaciones actuales muestran el empleo de novedosos procedimientos tendentes al mejoramiento de las propiedades cementantes de los materiales puzolánicos, y en particular de las zeolitas. Es lo que en la terminología científica se conoce como “activación”. La activación de los materiales puzolánicos puede efectuarse por diferentes procedimientos, entre los cuales, la activación térmica es uno de ellos.

La activación térmica es un método esencial para transformar las rocas volcánicas como las zeolitas, en un material más útil 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 estructura interna, lo que la vuelve más reactiva al mezclarse con el cemento. En relación con la activación térmica, una investigación interesante la acometen Kukobat et al. (2022). Según estos investigadores, el tratamiento térmico de las zeolitas antes de su uso como adsorbentes es imprescindible para eliminar el agua adsorbida de los poros, lo que aumenta la porosidad y el área superficial sin inducir deterioro estructural (Zheng et al. 2022). En este estudio, la zeolita se trata térmicamente a temperaturas entre 378°C y 1073°C, mejorando sensiblemente los parámetros estudiados (Lothenbach, 2021).

Kuldeyev et al. (2023), demuestran que las zeolitas naturales activadas térmicamente pueden utilizarse para purificar agua contaminada, ya que se mejora la capacidad de adsorción. La condición óptima de activación térmica obtenida en la investigación es de aproximadamente 550°C durante 2 h de calcinación. Para estos parámetros de activación, la adsorción fue del 87% para el níquel, del 99% para el cobre y el cadmio, y del 100% para el plomo. Esta investigación muestra un resultado muy interesante obtenido mediante la activación térmica.

Guerra Gonzales et al. (2021), muestran un estudio de la influencia de la temperatura y tiempo de activación térmica en la solubilidad alcalina de zeolitas. Estos investigadores realizan experimentos con temperaturas entre 200°C y 600°C, y tiempos de calcinación entre 1 h y 3 h, caracterizando el material sin activar y activado a través de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. La solubilidad de aluminio y el silicio en medio alcalino de las tobas zeolitizadas activadas térmicamente, muestran que los materiales calcinados a 500°C son más reactivos para el aluminio y el silicio. En cuanto a tiempo de calcinación, los mejores resultados se encuentran entre 60 y 90 minutos, con la mejor variante técnico-económica para tiempo de activación a 60 minutos. Estos resultados permiten mejorar las propiedades cementantes de las zeolitas activadas térmicamente.

Con estos presupuestos, el objetivo de la investigación que se somete a criterio de la comunidad científica, es evaluar los resultados obtenidos con la activación térmica de la zeolita proveniente del yacimiento Castilla La Pita, ubicado en la provincia de La Habana, Cuba, en sus propiedades como material cementante suplementario para la fabricación de hormigones.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño experimental

El método experimental empleado se basa en determinar el índice de actividad resistente con el cemento portland según la norma cubana NC TS 527, “Cemento hidráulico, métodos de ensayo, evaluación de puzolanas” (Similar a la norma internacional ASTM C 311/C 311-13). Esta norma establece un procedimiento mediante el cual se determina experimentalmente la resistencia a compresión a 28 días de briquetas de mortero con y sin material puzolánico, calculando el índice de actividad resistente con cemento como el cociente de dividir la resistencia a compresión de la briketa con muestras de material puzolánico entre la resistencia a compresión de la briketa elaborada sólo con cemento portland, expresados los resultados en porcentaje. Este enfoque fue seleccionado por dos motivos principales: en primer lugar, su amplia aceptación internacional y fiabilidad en resultados (Guerra et al, 2021); en segundo lugar, la disponibilidad de equipos y condiciones necesarias en el laboratorio del Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, en el cual se desarrolla la investigación. La elección prioriza un equilibrio entre rigor metodológico y factibilidad práctica, asegurando que el proceso se alinee con las capacidades técnicas disponibles y los estándares reconocidos



en la comunidad científica.

Las briquetas de mortero, tanto con la mezcla de control sin zeolita, como con las muestras de zeolita sin activar o activada, se elaboraron según la norma cubana NC 506, “Cemento hidráulico, determinación de resistencias mecánicas” (Similar a la norma europea EN 196-1). Las materias primas empleadas fueron cemento portland de uso general P-35, arena normalizada, zeolita proveniente del yacimiento Castilla La Pita sin activar y activada a diferentes rangos de temperatura y tiempo, y agua. En las briquetas de prueba, según la norma, se sustituye el 35% de cemento portland por zeolita. Para cada combinación se confeccionan tres briquetas.

Consiste en un experimento simple con dos variables independientes: temperatura de activación y tiempo de activación. De acuerdo con los resultados de la evaluación del estado del arte en el campo investigado, las temperaturas de activación de las zeolitas fluctúan entre 200°C y 800°C (Guerra et al, 2021; Kuldeyev et al., 2023). Los tiempos de activación varían entre 1 h y 3 h. Esto hace que, en el experimento, se seleccionaran para cada una de estas variables tres niveles. Como temperaturas: 200°C, 400°C y 600°C; y como tiempos de activación: 1 h, 2 h y 3 h. Este análisis arroja en el experimento diez combinaciones para la muestra de prueba: una con zeolita sin activar; y nueve con cada una de las combinaciones de temperatura y tiempo para la zeolita activada térmicamente. En este experimento, sólo es necesario determinar una variable dependiente: el índice de actividad resistente con cemento portland, a partir de la determinación experimental de la resistencia a compresión de las briquetas. Para la calcinación de la zeolita, se empleó la mufla del laboratorio del CECAT marca Thermo Scientific-FD1530M. Este equipo, diseñado para alcanzar temperaturas de hasta 1000°C, cuenta con características avanzadas de seguridad, dos opciones de control de temperatura y un aislamiento de ladrillo refractario de alta intensidad que garantiza durabilidad en condiciones de trabajo exigentes.

2.2. Caracterización de la materia prima

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. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos realizados al cemento portland en el propio laboratorio del CECAT y el cumplimiento de las especificaciones según la norma cubana NC 1340.

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	24,3	>17
	7 días	MPa	28,8	>25
	28 días	MPa	35,4	>35

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

2.2.2. Arena normalizada

Según la norma cubana NC 527, la arena utilizada para las probetas debe ser normalizada. Con este material se previene la segregación del mortero, ya que las variaciones en la clasificación de la arena pueden causar variaciones en la consistencia del mortero. Sin embargo, por no existencia en el laboratorio, no se pudo emplear arena normalizada industrial, siendo necesario fabricar la misma de acuerdo con las especificaciones de la norma DIN EN 196-1, “Arena estándar”. Para ello se tomó como base arena proveniente de la cantera “Peñalver”, de la provincia de La Habana, cuyas propiedades físicas y químicas son similares a las establecidas para la arena normalizada industrial. Para su fabricación, la arena “Peñalver” se sometió a un ensayo granulométrico, tomando de cada uno de los tamices la proporción especificada en la norma DIN EN 196-1. En la Tabla 2 se puede apreciar la composición granulométrica de la arena fabricada y el cumplimiento de las especificaciones.

Tabla 2

Granulometría de la arena normalizada fabricada.

Abertura del tamiz (mm)	Pasado en arena normalizada según DIN EN 196-1 (%)		Pasado en arena fabricada (%)
	Límite inferior	Límite superior	
2,00	0	0	0
1,6	2	12	7
1,00	28	38	33
0,50	62	72	67
0,16	82	92	87
0,08	98	100	99

2.2.3. Zeolita

La zeolita natural, en su estado inicial, se obtiene como piedra bruta de la cantera Castilla La Pita, apreciándose en la Figura 1 una foto tal como se extrae del terreno. Una vez transportada al laboratorio del CECAT, se inicia su procesamiento con la etapa de trituración, empleando para ello una trituradora de mandíbulas, cuyo objetivo es reducir el tamaño de las rocas en fragmentos más manejables. 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. Una vez seca, 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 únicamente las partículas que atraviesan el tamiz número 50. Este polvo micronizado, libre de impurezas y con un tamaño de partícula controlado, es el componente clave utilizado en la elaboración de las briquetas y en el proceso de activación.

Figura 1

Zeolita recién extraída.



Nota. Fotografía de elaboración propia, 2025.



Las propiedades mineralógicas y químicas de la zeolita, proporcionadas por el suministrador, pueden apreciarse respectivamente en las Tablas 3 y 4.

Al comparar esta composición y propiedades con los requisitos especificados en la norma cubana NC TS 528, “Cemento hidráulico-Puzolanas-Especificaciones” (Similar a la norma Internacional ASTM C 618 – 12a), se llega a la conclusión que el material extraído de la cantera 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.

Tabla 3

Composición mineralógica de la zeolita de yacimiento Castilla La Pita.

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

Tabla 4

Composición química de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita.

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

2.3. Activación térmica de la zeolita

La activación térmica se realizó sometiendo las muestras de zeolita ya micronizada a las tres temperaturas especificadas en el diseño experimental: 200°C, 400°C y 600°C. En cada una de estas temperaturas, el material se mantuvo durante períodos de una, dos y tres horas, con el fin de evaluar el efecto del tiempo de exposición en su reactividad posterior. En la Figura 2 se puede apreciar una foto de la mufla utilizada en el proceso de calcinación.

Figura 2

Mufla de laboratorio marca Thermo Scientific-FD1530M



Nota. Fotografía de elaboración propia, 2025.

2.4. Dosificaciones empleadas y elaboración de las briquetas

En el experimento se emplean las especificaciones de la norma cubana NC TS 527. Según la misma, es necesario preparar dos dosificaciones, una para la mezcla de control; y otra para cada una de las diez mezclas de prueba.

Las dosificaciones empleadas, obtenidas cumpliendo la norma cubana NC TS 527, pueden apreciarse en la Tabla 5.

La cantidad de agua requerida se determinó mediante un proceso iterativo en el laboratorio del CECAT, donde de manera gradual se iba incrementando la cantidad de agua hasta alcanzar los valores de fluidez establecidos, obteniendo como resultado 282,5 g.

Tabla 5

Dosificaciones empleadas en el experimento.

Material	Unidad de medida	Dosificación de control	Dosificaciones de prueba
Cemento portland P-35	g	450,0	292,5
Arena normalizada	g	1350,0	1350
Zeolita micronizada	g		118,8
Agua	g	282,5	182,5

Con cada una de las once dosificaciones se confeccionaron tres briquetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, aplicando el procedimiento establecido en la norma cubana NC 506. En la foto de la Figura 3 puede apreciarse una muestra de las briquetas confeccionadas.

Figura 3

Muestra de las briquetas confeccionadas con las dosificaciones de prueba.



Nota. Fotografía de elaboración propia, 2025.

2.5. Determinación del índice de actividad resistente con el cemento

Para la obtención el índice de actividad puzolánica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita se empleó el procedimiento descrito en la norma cubana NC TS 527. Para ello, a edad de 28 días, las briquetas se someten primero a un ensayo de flexión, y posteriormente, cada uno de los prismas obtenidos, a un ensayo de compresión.

En base a los resultados del ensayo de resistencia a compresión, la determinación del índice de actividad resistente con el cemento se calcula por la Fórmula 1.

$$IAP = \frac{A}{B} 100 \quad , \%$$
(1)

Siendo:

- A: Promedio de las resistencias a compresión de los prismas de las dosificaciones de prueba con zeolita sin activar o activada térmicamente, MPa.



- B: Promedio de las resistencias a compresión de los prismas de la dosificación de control, MPa.

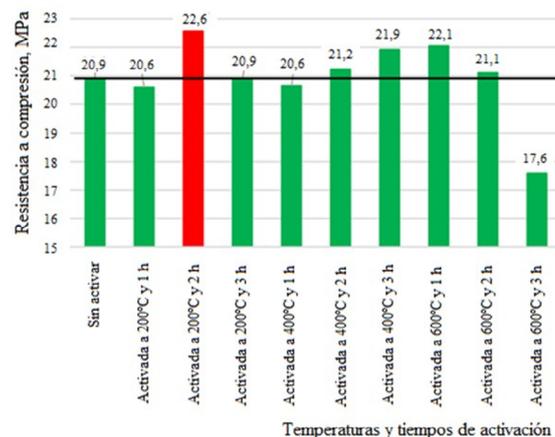
Según la norma cubana NC TS 528, para que un material pueda ser empleado como material cementante suplementario o como material puzolánico en sustitución del cemento portland en la producción de morteros y hormigones, o en la producción de cementos mezclados, el índice de actividad resistente con el cemento mínimo, debe ser de 75%, reconocido también como un criterio a nivel internacional.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 4 se aprecian los resultados de resistencia a compresión de las briquetas con las diferentes dosificaciones: las de control con zeolita sin activar; y las nueve con las diferentes combinaciones de temperatura y tiempo de calcinación de zeolita activada térmicamente. Y en la Figura 5 el comportamiento del índice de actividad resistente con el cemento respecto a la temperatura y tiempo de calcinación.

Figura 4.

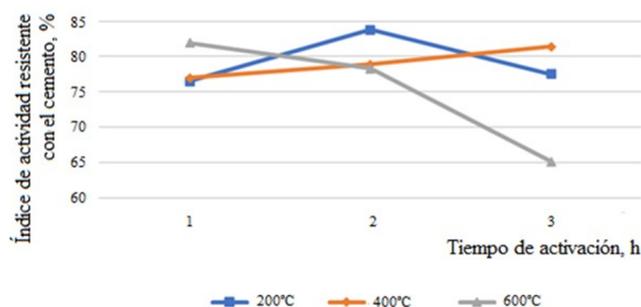
Comportamiento de la resistencia a compresión en función de temperatura y tiempo.



Nota. Figura elaborada por los autores.

Figura 5

Comportamiento del índice de actividad resistente con temperatura y tiempo.



Nota. Figura elaborada por los autores.

Los resultados de las Figuras 4 y 5 indican que la zeolita, aún sin activar térmicamente, posee un índice

de actividad resistente con el cemento superior a lo exigido como mínimo para que este material tenga potencialidades de utilización como material cementante suplementario (75%). El índice de actividad del 77,56% se toma por tanto como valor de control al evaluar los resultados con las diferentes combinaciones de temperatura y tiempo.

El análisis de estos resultados permite concluir que:

- El incremento de la temperatura de activación no tiene siempre un comportamiento progresivo en el índice de actividad resistente.
- Con temperatura de 400°C se aprecia un comportamiento lineal progresivo, que permite inducir que, de haber continuado el incremento del tiempo de calcinación a más de 3 horas, podría esperarse también un incremento de la actividad puzolánica de la zeolita, lo que es algo que se necesita seguir investigando; esta temperatura es la más estable en el comportamiento, e indica que no rompe la estructura amorfa. El valor máximo de 81,39%, aunque no el mayor obtenido, se agrupa entre los mayores. Por tanto, es una temperatura a considerar en futuras investigaciones.
- A temperatura de 200°C se aprecia un comportamiento ascendente con tiempo de calcinación de hasta 2 horas, pero después cae bruscamente la actividad puzolánica. Ello indica que, a esta temperatura, por encima de las 2 horas, tiende a romperse la estructura amorfa que se viene alcanzando con la zeolita en los primeros tiempos de activación. Pero sí se aprecia un resultado interesante que permite dar continuidad a la investigación: con la combinación de 200°C y tiempo de activación de 2 horas, se alcanza el mayor valor de actividad puzolánica, con 83,8%.
- El comportamiento a 600°C es desfavorable. Se aprecia un decrecimiento progresivo de la actividad puzolánica, lo que indica que a esta temperatura se modifica, desde los menores tiempos de activación, la estructura amorfa de la zeolita, por lo que debe descartarse. Incluso, con 3 horas de activación, la actividad puzolánica tiene valores por debajo del correspondiente a la zeolita sin activar.

Para el procesamiento estadístico de los resultados de las fluctuaciones de la resistencia a compresión de las briquetas se empleó el programa Statgraphics Centurion. Luego de analizar los valores medios mostrados en la Figura 4, se aprecia que el valor P de la prueba F, es menor a 0,05, lo que indica que tanto la temperatura como el tiempo de activación, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión de las briquetas.

Confirmado lo anterior corresponde efectuar la prueba de rangos múltiples a través del método LSD, con un 95% de confiabilidad, para identificar los diferentes grupos homogéneos. Los resultados se aprecian en la Tabla 6.

Tabla 6

Prueba de rangos múltiples para las medias de resistencia a compresión de las briquetas.

Muestras	Casos	Media, MPa	Grupos homogéneos			
			Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Sin activar	3	20,90	X			
200°C y 1 h	3	20,59		X		
200°C y 2 h	3	22,56			X	
200°C y 3 h	3	20,88	X			
400°C y 1 h	3	20,64		X		
400°C y 2 h	3	21,24	X			
400°C y 3 h	3	21,92			X	
600°C y 1 h	3	22,05			X	
600°C y 2 h	3	21,01	X			
600°C y 3 h	3	17,57				X

Puede apreciarse la existencia de cuatro grupos homogéneos, lo que significa que existen diferencias



estadísticamente significativas entre los rangos de temperatura y tiempo de calcinación entre un grupo y los demás.

Destaca el grupo 3, que precisamente es el de mayores valores en el índice de actividad puzolánica. Puede apreciarse que en el mismo no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de resistencia a compresión de las briquetas para temperatura de 200°C y tiempo de 2 h; temperatura de 400°C y tiempo de 3 h; y temperatura de 600°C y tiempo de 1 h. Ello significa que, aunque físicamente los resultados son diferentes, desde el punto de vista estadístico el resultado de la activación de la zeolita es similar. Queda entonces desde el punto de vista ingenieril, evaluar consumo energético al decidir la variante aconsejable, que, en el caso de este experimento, fue temperatura de 200°C y tiempo de activación de 2 h.

4. Conclusiones

La investigación demuestra que, es factible el incremento de la actividad puzolánica de la zeolita del yacimiento Castilla La Pita mediante su activación térmica, y ratifica por tanto la tendencia de los últimos años en este sentido con zeolitas de otras regiones, lo que incrementa su valor de uso y puede contribuir al ahorro de cemento portland, el recurso más caro y más contaminante entre los materiales componentes del hormigón. Para el caso particular de la zeolita objeto de estudio, se ha logrado el mayor índice de actividad resistente a relativamente baja temperatura y tiempo de calcinación, lo que también contribuye al ahorro energético. En investigaciones futuras, resultaría conveniente evaluar el comportamiento de la zeolita a temperatura de 400°C y mayores tiempos de activación a los experimentados, dada la tendencia ascendente de este parámetro. Cabe señalar que la metodología seguida en esta investigación, puede servir de referencia para el desarrollo de investigaciones similares.

Como parte de la misma investigación, queda evaluar el comportamiento de la zeolita activada térmicamente a temperatura de 200°C y tiempo de activación de 2 h, como adición en sustitución parcial del cemento portland, en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones, lo que será objeto de un segundo artículo

5. Referencias bibliográficas

- 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 Mustelie, 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
- 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>
- 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>

- 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. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852021000300638
- Islam, M., & Mohr, B. (2022). Early Age Properties and Microstructural Characterization of Zeolite Based Cementitious Materials. *Advances in Civil Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1520/acem20210131>.
- 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>
- Lothenbach, B., & B. (2021). Thermodynamic study on zeolite formation at cement/clay interfaces. *Goldschmidt2021 abstracts*. https://goldschmidtabstracts.info/2021/3835.pdf?utm_source=consensus.
- Mohr, B., e Islam, M. (2023). Propiedades a largo plazo y caracterización microestructural de materiales cementantes a base de zeolita clinoptilolita natural. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01278-4>.
- Petkova, V., Shopska, M., Stoyanov, V., & Mihaylova, K. (2024). A Study of the Influence of Thermoactivated Natural Zeolite on the Hydration of White Cement Mortars. *Materials*, 17. <https://doi.org/10.3390/ma17194798>.
- 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. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732022000100005&script=sci_abstract.
- 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>.
- 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*. https://www.researchgate.net/publication/319153397_La_creacion_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>
- Zheng, X., Liu, K., Gao, S., Wu, Z., & Wang, F. (2022). Effect of pozzolanic reaction of zeolite on its internal curing performance in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710222015091?via%3Dihub>.