

Optimización sostenible de propiedades térmicas y mecánicas en concreto mediante aditivos naturales: Enfoque molecular

Sustainable Optimization of Thermal and Mechanical Properties in Concrete Using Natural Additives: A Molecular Approach

DOI: DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i16.283>

EDGARDO JONATHAN SUÁREZ-DOMÍNGUEZ

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. ORCID: 0000-0002-1342-5732
Correo electrónico: edgardo.suarez@docentes.uat.edu.mx

Recepción: 20 de enero de 2024 Aceptación: 5 de junio de 2024

RESUMEN

Este artículo explica la interacción molecular en el concreto y su impacto en las propiedades mecánicas, centrándose específicamente en la resistencia y la transferencia de calor. Se hace hincapié en el papel fundamental de las interacciones moleculares en la configuración de las características macroscópicas del concreto, en particular su resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión. El concreto, compuesto por cemento, agua, áridos y aditivos, ve su comportamiento estructural intrincadamente influenciado por estas interacciones moleculares. Se preparó una muestra de 200 kg/cm² con y sin aditivo (obtenido de *Opuntia ficus - indica*). Los resultados ponen de manifiesto un notable aumento de la velocidad del pulso ultrasónico con la incorporación de aditivos. Además, hay modificaciones perceptibles en la capacidad térmica, lo que subraya el impacto tangible de las interacciones moleculares. Las representaciones micrográficas retratan vívidamente la reducción de los espacios entre los componentes dentro del medio estudiado, que establece una correlación con las alteraciones en la velocidad del pulso ultrasónico y las propiedades térmicas asociadas a dicha compactación. Este estudio brinda conocimiento de las propie-

dades que son mejoradas y que impactan en la sostenibilidad del material, mediante el empleo de materiales naturales.

Palabras clave: aditivos naturales, propiedades térmicas, sostenibilidad en concreto

ABSTRACT

This paper delves into the Molecular Interaction in Concrete and its Impact on Mechanical Properties, specifically focusing on Strength and Heat Transfer. Emphasis is placed on the pivotal role of molecular interactions in shaping the macroscopic characteristics of concrete, particularly its compressive, tensile, and flexural strength. Concrete, comprising cement, water, aggregates, and additives, sees its structural behavior intricately influenced by these molecular interactions. It was prepared a 200kg/cm² samples with and without and additive (obtained from *Opuntia ficus - indica*). The findings highlight a noticeable increase in ultrasonic pulse velocity with the incorporation of additives. Additionally, there are discernible modifications in thermal capacity, underscoring the tangible impact of molecular interactions. Micrographic representations vividly portray the reduction in spaces between the



components within the studied medium, establishing a correlation with alterations in ultrasonic pulse velocity and thermal properties associated with such compaction. This study provides knowledge of the properties that are improved and that impact the sustainability of the material, thorough the use of natural materials.

Keywords: natural additives, thermal properties, concrete sustainability

INTRODUCCIÓN

El concreto se destaca como uno de los materiales más utilizados en el mundo, y es fundamental en la industria de la construcción. Su atractivo generalizado se basa en una amalgama distintiva de rasgos, lo que lo convierte en un componente versátil e indispensable en una gran variedad de aplicaciones (Gencel *et al.*, 2021; Aitcin, 2003). Este material, compuesto principalmente por cemento, agua, áridos y aditivos, se ha convertido constantemente en la opción preferida en el panorama de la construcción, pues da forma a infraestructuras, edificios y obras civiles.

La adaptabilidad del concreto radica en su capacidad para satisfacer diversas necesidades y especificaciones estructurales. Su impresionante resistencia a la compresión lo posiciona como un soporte ideal para cargas sustanciales, particularmente en aplicaciones como columnas y cimientos (Kagermanov y Markovic, 2023). La maleabilidad para asumir formas y moldes variados durante el proceso de fraguado facilita la creación de estructuras arquitectónicas intrincadas y visualmente cautivadoras.

El punto focal de la interacción molecular en el concreto tiene una importancia primordial, ya que influye profundamente en sus propiedades macroscópicas, que abarcan la resistencia a la compresión, la tracción y la flexión. El concreto, constituido por una mezcla de cemento, agua, agregados (como arena y grava) y aditivos, ve su comportamiento estructural intrincadamente moldeado por las interacciones a nivel molecular entre estos componentes. El agua asume un pa-

pel fundamental, participando en la hidratación del cemento, un proceso químico en el que el cemento reacciona con el agua produce compuestos cristalinos (Al-Rased y Jabari 2020) como el silicato de calcio hidratado (CSH) y la etringita. Estos cristales llenan los espacios intersticiales entre las partículas agregadas y forjan una matriz robusta que contribuye significativamente a la resistencia a la compresión del concreto (Akkaya y Cagatay 2021; Hewlet y Liska, 2019).

La adherencia entre los agregados y la pasta de cemento surge como indispensable para la resistencia del concreto (Akgul *et al.* 2022). La eficacia de esta interfaz depende de los atributos químicos y físicos de los materiales involucrados. La adherencia robusta garantiza una distribución equitativa de las cargas y actúa como elemento disuasorio contra la formación de grietas. La naturaleza porosa del concreto, ligada al contenido de agua en la mezcla, ejerce un impacto perceptible en la resistencia a la compresión y la permeabilidad. Es imperativo lograr el equilibrio en el contenido de agua, ya que se necesita una cantidad adecuada para una hidratación óptima del cemento, a la vez que un exceso puede resultar en una estructura más porosa y menos resistente.

Además, las interacciones moleculares son fundamentales en la determinación de la durabilidad del concreto. La exposición a factores ambientales, como la humedad y los agentes químicos, puede perturbar las interacciones dentro de la matriz de cemento y comprometer la resistencia a largo plazo. Vale la pena señalar que, si bien los estudios se han centrado tradicionalmente en las propiedades macroscópicas (Barbhuiya y Das 2023), existe una necesidad imperiosa de estudios de interacción microscópica para comprender de manera integral las complejidades en juego.

Las interacciones moleculares, en particular la hidratación del cemento y la formación de compuestos cristalinos como el silicato de calcio hidratado (CSH) y la etringita, no solo contribuyen a la resistencia del concreto a la compresión, sino también tienen un impacto significativo en su conductividad térmica. Estudios como los de Al-Rased y Jabari (2020), Akkaya y Cagatay

(2021), y Hewlet y Liska (2019) resaltan que la estructura molecular del CSH y otros compuestos cristalinos influye en la capacidad del concreto para conducir el calor. Una comprensión más profunda de estas interacciones moleculares puede ayudar a optimizar las formulaciones de concreto para aplicaciones donde se requiera un control preciso de la transferencia de calor, como en la construcción de edificios energéticamente eficientes o en la producción de materiales para almacenamiento térmico

El objetivo del presente artículo es avanzar en el conocimiento actual sobre las interacciones moleculares en el concreto y su impacto en las propiedades del material, con el fin de impulsar la innovación en la construcción de materiales más avanzados y sostenibles.

MÉTODO

El diseño y la ejecución de este estudio se basaron en un conjunto de fundamentos teóricos y metodológicos que permitieron abordar de manera integral la influencia del mucílago de nopal en las propiedades estructurales y térmicas del concreto, soportados en trabajos señalados por Aranda-Jiménez *et al.*, 2020, y Suarez-Domínguez *et al.*, 2022. La dosificación de los elementos constituyentes del concreto se realizó sobre la base de estándares reconocidos en la industria de la construcción y en la literatura científica previa. La selección de la proporción de cemento, grava y arena se fundamentó en la necesidad de obtener una resistencia a la compresión específica para los propósitos del estudio, manteniendo al mismo tiempo una composición que reflejara las condiciones comunes de sistemas constructivos existentes. La adición del mucílago de nopal se justificó por su potencial para mejorar ciertas propiedades del concreto, según lo informado por Suárez-Domínguez *et al.*, 2022. Esta elección se basó en la investigación previa que demostró los efectos beneficiosos de los aditivos orgánicos en la resistencia y la durabilidad del concreto, así como en su capacidad para reducir la permea-

bilidad y mejorar la trabajabilidad. En cuanto a las pruebas realizadas, se seleccionaron métodos reconocidos y estandarizados en la industria. La aplicación de la teoría de la fuente de calor transitoria lineal para la evaluación de la transferencia de calor se fundamentó en su idoneidad para investigar las propiedades térmicas del concreto.

Para determinar el tiempo de transición de las ondas ultrasónicas del material se siguió la norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2004 y se utilizó el equipo Controls E48. Esta norma se seleccionó por su relevancia en la evaluación de la calidad y las propiedades del concreto, con lo que se aseguró la consistencia y la comparabilidad de los resultados.

El análisis microscópico se llevó a cabo utilizando un equipo FEI, el ESEM-QUNTA 200, que ofrece la capacidad de visualizar y analizar la estructura y la morfología de las muestras con diferentes escalas de magnificación. Este enfoque permitió la caracterización detallada de la microestructura del concreto y proporcionó información complementaria sobre las interacciones moleculares en la matriz de cemento.

Se elaboró una muestra de concreto con una resistencia a la compresión de 200 kg/cm², a través de una mezcla diseñada que consiste en 26% de cemento, 50% de grava y 29% de arena de río proveniente de Altamira, Tamaulipas. Esta formulación se enriqueció aún más con la adición del 11% en peso de solución de mucílago de nopal, como se describe más adelante, en relación con el peso total de la mezcla. Cabe destacar que la mezcla inicial solo incorporaba agua potable. Por el contrario, la segunda muestra se sometió a un proceso distinto, integrando un componente líquido al 11% derivado de un extracto al 10% de mucílago de nopal. Este extracto fue elaborado a partir de *Opuntia ficus - indica*, siguiendo la metodología descrita por Suárez-Domínguez 2017. Cada variante de las muestras de concreto se sometió a una evaluación exhaustiva, meticulosamente realizada tres veces por triplicado, lo que arrojó un total de nueve muestras para cada formulación.

Después de 28 días, se realizaron pruebas de transferencia de calor, pulso ultrasónico de

acuerdo con la norma NMX-C-275-ONNCCE-2004 y visualización microscópica por campos, de acuerdo con Suárez-Domínguez, 2020.

La transferencia de calor en este estudio se basa en la aplicación de la teoría de la fuente de calor transitoria lineal, específicamente adecuada para investigar las propiedades térmicas en suelos, concreto y componentes. El método consiste en medir y correlacionar los cambios de temperatura dentro de un material y su transferencia a través de una aguja térmica. Para ello se empleó el medidor de conductividad térmica KD2 Pro equipado con el sensor SH-1, y las lecturas se tomaron por triplicado durante 30 minutos.

Para determinar el tiempo de transición de las ondas ultrasónicas del material, se empleó un equipo Controls E48, siguiendo las directrices normativas establecidas en la NMX-C-275-ONNCCE-2004 (ONNCCE, 2004). Para esta prueba se utilizaron tres muestras, y los datos se tomaron por triplicado. Este enfoque estadístico garantizó la robustez de los datos y permitió obtener conclusiones confiables sobre las diferencias observadas entre las muestras.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) y el análisis se realizaron en dos etapas. Inicialmente, se empleó la microscopía óptica, seguida de la microscopía electrónica y la microscopía de barrido. Esto último se realizó utilizando un equipo FEI, el ESEM-QUNTA 200, a una aceleración de 200V y 20keV en vacío parcial. El análisis se llevó a cabo a resoluciones de 10 nm a 500X, 1000X y 2000X.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto a la velocidad ultrasónica, se registró a 4680 m/s para la muestra que contenía aditivo en solución. En marcado contraste, la muestra de concreto desprovista de aditivos, a menudo denominada “muestra blanca”, exhibió una velocidad menor de 4031 m/s, con una medición del 2% de error, lo que evidencia una reducción relativa del 13.8% en la velocidad, lo que sugiere implicaciones consecuentes para la propagación de las ondas ultrasónicas.

Cambiando el enfoque a la prueba de capacidad térmica, se observa una notable modificación en la difusividad térmica, como se detalla en la tabla 1.

TABLA 1
Coeficientes de transferencia de calor

Prueba	α mm ² /s	R °C·cm/W	C MJ/m ³ k	Error
Blanco (concreto sin dosificar)	0.947	40.70	1.298	0.1271
Concreto con aditivo	1.318	28.10	1.388	0.1019

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las pruebas proporcionan información valiosa sobre las propiedades térmicas de los diferentes tipos de concreto, específicamente en términos de difusividad térmica (α), resistencia térmica (ρ), capacidad térmica específica (C) y efusividad térmica (Err). El concreto aditivo muestra una mayor difusividad térmica, α (1,318 mm²/s), en comparación con el concreto no dosificado (0,947 mm²/s). Esto sugiere que la introducción del aditivo tiene un impacto significativo en la capacidad del material para conducir el calor. Un aumento de la difusividad térmica puede estar relacionado con la modificación de la estructura interna del concreto por el aditivo.

El aumento de la difusividad térmica y la disminución de la resistencia térmica en el concreto implicarían un mayor flujo de calor a través de las estructuras construidas con este material. Esto podría resultar en un aumento de las ganancias térmicas durante las temporadas de calor, lo que podría aumentar el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas. Además, este aumento en el consumo energético tendría un impacto negativo en la sostenibilidad de las edificaciones, ya que se aumentaría la demanda de recursos energéticos no renovables y se incrementaría la huella de carbono de los edificios. Por esta razón, aunque puede tener una mejora en la resistencia, u otras propiedades, es importante la consideración en cuanto al uso en zonas que no se encuentren en

contacto con el sol, o añadir otros componentes que permitan disminuir esta difusividad.

La resistencia térmica (ρ) del concreto no dosificado es mayor ($40,70 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$), en comparación con el concreto con aditivo ($28,10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$). Una menor resistencia térmica en el concreto aditivo indica una mayor capacidad para conducir el calor. Es importante destacar que los resultados sin aditivos son similares a otras fuentes (Malik *et al.*, 2021), mientras que en nuestro caso se puede modificar con el uso de aditivos. Esto puede estar asociado a cambios en la estructura que favorecen la transferencia de calor: podría modificar la distribución de las partículas dentro del concreto o alterar la conectividad entre ellas, lo que a su vez facilitaría la transferencia de calor a través del material. En otras palabras, los cambios en la estructura del concreto causados por la inclusión de aditivos pueden abrir caminos más eficientes para que el calor se mueva a través del material. Esto significa que el calor puede propagarse más fácilmente de una región a otra dentro del concreto, lo que también da luz en la búsqueda de la dosificación de otros productos que disminuyan dicha transferencia o puedan colocarse membranas o elementos superficiales para evitar el paso de calor.

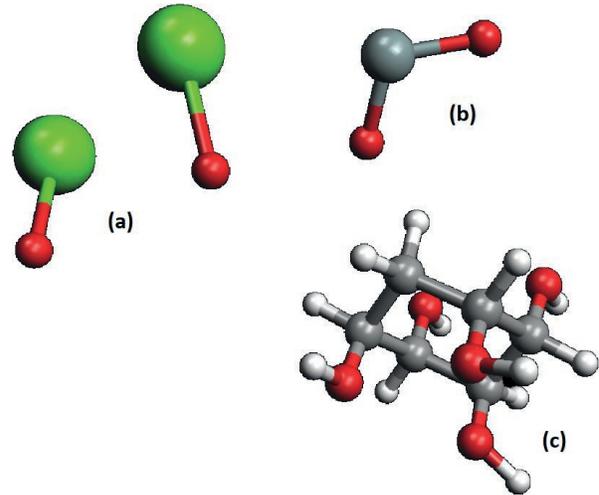
Por otro lado, la capacidad térmica específica (C) del concreto con aditivo ($1,388 \text{ C MJ}/\text{m}^3\text{K}$), es ligeramente superior a la del concreto sin dosificar ($1,298 \text{ C MJ}/\text{m}^3\text{K}$). Este resultado sugiere que el aditivo puede haber contribuido a una mayor capacidad del material para almacenar calor por unidad de masa y temperatura. Por último, la efusividad térmica (Err) del concreto con aditivo es menor ($0,1019$) en comparación con el concreto sin dosificación ($0,1271$). La efusividad térmica está relacionada con la capacidad del material para intercambiar calor con su entorno. Una menor efusividad térmica en el concreto con aditivo podría indicar una respuesta térmica que implica que puede acelerar la ganancia térmica dentro de las edificaciones y alterar así las características correspondientes.

Para el análisis teórico se utilizaron las variantes representativas de óxido de calcio (CaO) y

dióxido de silicio (SiO_2) para la primera aproximación del análisis; se muestran en la figura 1.

FIGURA 1

(a) Óxido de calcio (CaO), (b) dióxido de silicio (SiO_2) y molécula mínima representativa del aditivo, carbohidrato orgánico (c)



El resultado obtenido a través de la evaluación teórica utilizando el software Argus Lab revela información valiosa sobre la interacción entre las partículas en presencia de un agregado orgánico. La observación de una mayor interacción entre estructuras similares cuando está presente un agregado orgánico plantea preguntas interesantes sobre la dinámica molecular y las fuerzas intermoleculares involucradas.

La elucidación proporcionada con respecto a la formación de cristales de silicato y óxido, con distancias teóricas específicas entre componentes, especialmente en presencia de un medio similar a un gel, sugiere el potencial para la formación de enlaces específicos y la influencia del agregado orgánico en esta interacción. Cabe destacar que estos conocimientos pueden resultar cruciales en la modificación de la composición del concreto (Sivakrishna *et al.*, 2020) para mejorar la sostenibilidad.

La distancia teórica especificada de $3,523281$ angstroms entre CaO y CaO antes de la introducción de un medio similar a un gel, junto con la variación de $3,520036$ a $3,520169$ angstroms en presencia y

ausencia de óxido de silicio, subraya una sensibilidad significativa a las condiciones ambientales y la presencia de compuestos específicos. Esto implica que las interacciones moleculares en el concreto están influidas no solo por la composición química, sino también por las condiciones circundantes y la inclusión de aditivos.

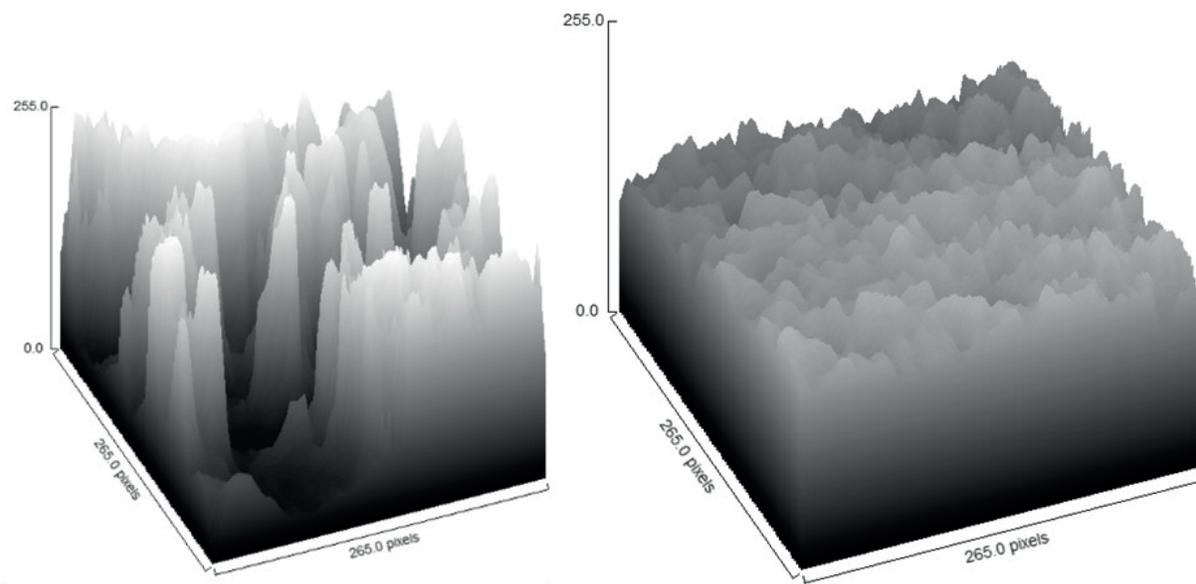
El examen de las muestras micrográficas arroja un resultado notable en términos de rugosidad superficial, y ofrece información valiosa sobre el impacto del aditivo en la textura superficial del concreto. La figura 2 (b) exhibe claramente una reducción en la rugosidad en comparación con la figura 2 (a), lo que sugiere un efecto discernible del aditivo en la suavidad de la superficie del concreto. La disminución de la rugosidad puede estar relacionada con alteraciones en la composi-

ción o distribución de las partículas en la matriz de concreto, lo que puede dar lugar a una superficie más uniforme y homogénea. La observación visual directa de las imágenes demuestra inequívocamente que la muestra de concreto con el aditivo posee una superficie menos rugosa en comparación con la muestra sin el aditivo. Esta distinción visual apoya firmemente la noción de que la mezcla ha influido apreciablemente en la textura de la superficie del concreto.

Se utilizó el programa ImageJ para obtener la imagen de superficie a partir de la imagen fotográfica. Este enfoque metodológico proporciona una base cuantificable y objetiva para evaluar la rugosidad, lo que permite comparaciones precisas entre muestras.

FIGURA 2

(a) Parcela superficial de la muestra de concreto sin aditivo; (b) muestra con aditivo



La reducción de la rugosidad puede tener implicaciones prácticas en una variedad de contextos. En la construcción, una superficie más lisa puede facilitar los procesos de acabado y mejorar la estética del material. Además, en aplicaciones donde la fricción o la adhesión son consideraciones importantes, la textura de la superficie puede afectar el rendimiento del concreto. Sin embargo,

es importante destacar que esta reducción de la rugosidad no implicaría necesariamente alteraciones significativas en las temperaturas a través de la transferencia de calor, que se ve aumentada en el concreto con aditivo. La mejora en la conducción térmica del concreto con aditivo puede contribuir a una distribución más uniforme del calor a lo largo de su superficie, lo que podría

tener efectos adicionales en su capacidad para absorber y disipar el calor generado por la radiación solar.

Las ventajas en materia de sustentabilidad que se pueden derivar de las conclusiones de este estudio son las siguientes:

- **Reducción del consumo de material:** Al mejorar las propiedades mecánicas del concreto a través de aditivos como el obtenido de *Opuntia ficus-indica*, es posible lograr mayores resistencias con menor cantidad de material. Esto puede traducirse en una reducción en el consumo de recursos naturales, como cemento y áridos, lo que contribuye a la sostenibilidad, al disminuir la demanda de materias primas.
- **Eficiencia energética:** Mejorar las propiedades térmicas del concreto puede tener beneficios en términos de eficiencia energética en los edificios. Un concreto con mejor capacidad térmica puede ayudar a regular la temperatura interior de los edificios reduciendo la necesidad de calefacción o refrigeración y, por tanto, disminuyendo el consumo energético.

Las ventajas en eficiencia energética derivadas de las mejoras en las propiedades térmicas del concreto serían especialmente relevantes durante las temporadas de temperaturas moderadas o estacionales. En estas épocas del año, un concreto con una mejor capacidad térmica podría ayudar a regular la temperatura interior de los edificios de manera más efectiva, reduciendo así la necesidad de calefacción o refrigeración y disminuyendo el consumo energético asociado. Sin embargo, es importante considerar que en climas extremos, como durante los meses de invierno o verano, estas mejoras podrían no traducirse necesariamente en una reducción del consumo energético. En cambio, en tales condiciones climáticas extremas las demandas de climatización podrían aumentar, debido a la necesidad de enfriar o calentar los espacios, lo que podría contrarrestar los beneficios de las propiedades térmicas mejoradas del concreto. Por lo tanto, aunque las mejoras en la eficiencia energética son im-

portantes, es esencial considerar el contexto climático específico al evaluar su impacto en el consumo energético de un edificio.

- **Menor huella de carbono:** Si la adición de aditivos mejora la resistencia del concreto, es posible que se requieran menos reparaciones y reemplazos con el tiempo. Esto puede contribuir a la reducción de las emisiones de carbono asociadas con la producción y el transporte de nuevos materiales de construcción.
- **Promoción de materiales sostenibles:** El uso de aditivos de fuentes naturales, como *Opuntia ficus-indica*, puede promover el uso de materiales más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente en comparación con los aditivos químicos convencionales. La búsqueda de alternativas naturales puede reducir la dependencia de los recursos no renovables.
- **Durabilidad mejorada:** Si las propiedades mecánicas y térmicas, en dependencia del contexto, pueden considerarse “mejores” y se traducen en una mayor durabilidad del concreto, esto podría significar menor necesidad de mantenimiento y reparación a lo largo del tiempo. La reducción de la frecuencia de los trabajos de mantenimiento contribuye a la sostenibilidad, al disminuir la generación de residuos y el consumo de recursos asociados a las reparaciones.

CONCLUSIONES

La hidratación del cemento y la formación de compuestos cristalinos durante el proceso son fundamentales para la configuración de propiedades macroscópicas del concreto, como la resistencia a la compresión. Se observó que la muestra de concreto con una resistencia a la compresión de 200 kg/cm² presentó una velocidad ultrasónica de 4680 m/s, mientras que la muestra sin aditivos registró 4031 m/s, lo que representa una reducción relativa de la velocidad.

La incorporación de aditivos, como el mucílago de nopal, altera las características térmicas del concreto, al aumentar su capacidad de conduc-

ción y almacenamiento de calor. Por ejemplo, la difusividad térmica del concreto aditivo fue de $\alpha = 1,318 \text{ mm}^2/\text{s}$, en contraste con $\alpha = 0,947 \text{ mm}^2/\text{s}$ para el concreto sin aditivos.

Las fuerzas intermoleculares, como las Van der Waals, tienen un impacto significativo en la cohesión dentro de la matriz de cemento. La resistencia térmica del concreto no dosificado fue de $\rho = 40,70 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$, mientras que para el concreto con aditivo fue de $\rho = 28,10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$, lo cual indica una mayor capacidad de conducción del calor en el concreto aditivo.

La durabilidad del concreto está estrechamente relacionada con factores ambientales que pueden afectar las interacciones moleculares dentro de la matriz de cemento. La capacidad térmica específica del concreto con aditivo fue ligeramente superior ($C = 1,388 \text{ C MJ}/\text{m}^3\text{K}$), en comparación con el concreto sin dosificar ($C = 1,298 \text{ C MJ}/\text{m}^3\text{K}$).

La capacidad de anticipar y regular las interacciones de las partículas promete mejorar la resistencia, la durabilidad y otras propiedades clave del concreto. Sin embargo, es crucial considerar el contexto climático específico al evaluar el impacto de las propiedades térmicas mejoradas del concreto en el consumo energético de un edificio.

Este estudio contribuye significativamente al conocimiento continuo en el diseño de elementos arquitectónicos duraderos y confiables, subrayando la necesidad esencial de comprender y controlar las interacciones moleculares para impulsar la creación de hormigones más eficientes, resistentes y sostenibles. En términos prácticos, una comprensión matizada de estas interacciones moleculares informa directamente el diseño y la formulación de hormigones con propiedades específicas. La capacidad de anticipar y regular las interacciones de las partículas promete mejorar la resistencia, la durabilidad y otras propiedades clave del concreto, lo que allana el camino para el desarrollo de materiales de construcción más eficientes y sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ana Iris Peña Maldonado e Ignacio G. Becerril Juárez y al Laboratorio Nacional de Investigación en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN), IPICYT, por facilitar el uso de sus instalaciones.

REFERENCIAS

- Aitcin, P. C. (2003). The Durability Characteristics of High Performance Concrete: A Review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 409-420. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00081-1)
- Akgül, M., Doğan, O. y Odacıoğlu, O. G. (2022). A Review on Adherence in Reinforced Concrete. *Civil Engineering beyond Limits*, 4, 1765.
- Akkaya, Y. y Cagatay, I. H. (2021a). The Effects of Different Supplementary Cementitious Materials on the Compressive Strength and Microstructure of Self-compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 304, 124527.
- (2021b). Investigation of the Density, Porosity, and Permeability Properties of Pervious Concrete with Different Methods. *Construction and Building Materials*, 294, 123539. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123539>
- Al-Rased, A. A. y Jabari, M. S. (2020a). Influence of Nano-silica Particles on Mechanical Properties and Microstructure of High Strength Concrete. *Construction and Building Materials*, 235, 117490.
- (2020b). Dual-crystallization Waterproofing Technology for Topical Treatment of Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00408.
- Barbhuiya, S. y Das, B. B. (2023). Molecular Dynamics Simulation in Concrete Research: A Systematic Review of Techniques, Models and Future Directions. *Journal of Building Engineering*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.107267>
- Gencil, O., Karadag, O., Oren, O. H. y Bilir, T. (2021). Steel Slag and its Applications in Cement and Concrete Technology: A Review. *Construction and Building Materials*, 283, 122783. Dispo-

- nible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>
- Hewlet, P. C. y Liska, M. (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier.
- (Ed.) (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann.
- Kagermanov, A. y Markovic, I. (2023). An Overview on Finite Element-modelling Techniques for Structural Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19(11), 1585-1599. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2045612>
- Malik, M., Bhattacharyya, S. K. y Barai, S. V. (2021). Thermal and Mechanical Properties of Concrete and its Constituents at Elevated Temperatures: A Review. *Construction and Building Materials*, 270, 121398. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121398>
- ONNCCE (2004). Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-275-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico a Través del Concreto-Método de Ensayo. Declaratoria de Vigencia. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5640288&fecha=06/01/2022#gsc.tab=0
- Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O. y Kumar, K. R. (2020). Green Concrete: A Review of Recent Developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54-58. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202>
- Suárez-Domínguez, E. J., Aranda-Jiménez, Y. G., Zuñiga-Leal, C. y De León-Ramírez, A. (2017). Technology Effect of the Addition of Cactus Mucilage and Fibers to Samples of Poured Earth. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(35), 131-137.
- Suárez-Domínguez, E. J., Pérez-Rivao, A., Sánchez-Medrano, M. T., Pérez-Sánchez, J. F. e Izquierdo-Kulich, E. (2020). Mesoscopic Model for the Surface Fractal Dimension Estimation of Solid-solid and Gas-solid Dispersed Systems. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100407.