

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**
Manuel Fernández Cánovas – **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vicepresidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vicepresidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesorero

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

Enrique Cervera Aguilar, **México**
Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
(CINVESTAV IPN – Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe (2022-2023):

Dra. Edna Possan
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Curitiba, **Brasil**

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Facultad de Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo León, **México**

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernández Cánovas
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.
Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidad Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini

Universidad de Perugia,

Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,

Chennai, **India**

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistaalconpat.org>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el primer número de nuestro doceavo año.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de contribuciones producto de investigación básica o aplicada relacionada directamente con la solución de problemas afines con el control de calidad, patología y recuperación de las construcciones siendo bienvenidos en estas áreas casos de estudio relacionados.

Esta edición V12N1, inicia con un trabajo proveniente de **Brasil**, donde Emerson Félix y colegas presentan una investigación experimental con el objetivo de evaluar la influencia de la frecuencia de los esfuerzos, el nivel de tensión aplicada y la resistencia a la compresión del material sobre el comportamiento a fatiga del hormigón. Los ensayos se realizaron considerando tres frecuencias de carga (0,125, 0,25 y 0,5 Hz), dos niveles de tensión máxima (50% y 70% de la resistencia a la compresión) y hormigones con tres clases de resistencia a la compresión (30, 50 y 70 MPa). Los resultados encontrados indican que a medida que aumenta la frecuencia de carga, la vida en condiciones de fatiga aumenta exponencialmente. Sin embargo, se observó que la vida en condiciones de fatiga es menor en los hormigones de alta resistencia a la compresión, y presenta una relación inversa con la resistencia a la compresión del material.

En el segundo trabajo, Jordi Payá y colegas de **España** hacen ver que los cementos de activación alcalina (CAA) requieren de un componente alcalino para la activación del precursor. La fabricación del activador alcalino (AA) supone un consumo energético y de materias primas muy importante, de modo que la huella de carbono de los CAA está fundamentalmente influenciada por ese factor. Una alternativa es el uso de otras materias para la preparación del AA. En este trabajo se realiza un exhaustivo análisis de las diferentes alternativas: materias de base silíceas para la preparación de silicatos alternativos y materias de base alcalina. Se comparan de forma relativa las huellas de carbono con respecto a cementos Portland comerciales, y se analiza el efecto que tiene la sustitución de reactivos comerciales por activadores alternativos.

El tercer artículo proviene de **Brasil**, donde Fernanda Pacheco y colegas analizan el potencial de cicatrización del hormigón al utilizar soluciones químicas y bacterianas, evaluando diferentes materiales que se pueden utilizar para su encapsulación. Para encapsular los agentes se utilizaron arcilla y perlita expandidas. Para analizar la efectividad de la curación, se realizaron técnicas de análisis visual utilizando un microscopio óptico de alta precisión y microtomografía 3D. Los resultados apuntaron a un mejor desempeño de la mezcla

BAC.AE (solución bacteriana encapsulada in arcilla expandida), utilizando solución bacteriana encapsulada in arcilla expandida, que fue capaz de cicatrizar grietas de hasta 0.57mm. Las mezclas BAC.PE (solución bacteriana encapsulada in perlita expandida), solución bacteriana encapsulada in perlita expandida, y SS (silicato de sodio), solución química agregada en el momento de la mezcla para reemplazar el agua, cicatrizaron grietas de 0.16 mm y 0.29 mm respectivamente.

En el cuarto artículo procedente de **Brasil**, Rayara Pinto Costa y colegas evalúan la variabilidad en la previsión de la vida útil de estructuras de hormigón a través de cuatro modelos que estiman el avance natural del frente de carbonatación. Los resultados muestran que hay variabilidad en el frente de carbonatación estimado. Los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018) presentan valores estimados cercanos a los medidos, mientras que los de Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) subestiman y sobreestiman el frente de carbonatación natural. Sólo se consideraron los hormigones sin adición de materiales cementantes suplementarios, debido a las limitaciones del modelo. La resistencia a compresión, concentración de CO₂ y humedad relativa tienen influencia significativa en los resultados y la variabilidad depende de los parámetros que se consideren en los modelos.

El quinto artículo, de Ronei Hoffmann Malaquias y colegas, proviene de **Brasil** y analiza el desempeño del tratamiento de la humedad ascendente en paredes, mediante el uso de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrófugos disponibles en el mercado brasileño, con su introducción por gravedad. La evaluación de la humedad ascendente se realizó calculando la tasa de absorción de agua en las muestras, combinada con las imágenes obtenidas por la cámara termográfica. De los resultados encontrados se concluyó que el tratamiento no redujo por completo la patología en las paredes, sin embargo, ambos productos obtuvieron un buen desempeño, logrando reducir considerablemente las tasas de absorción de agua.

El sexto trabajo de este número lo escriben Carlos Fernando Gomes do Nascimento y colegas de **Brasil**. Ellos verifican si los vacíos intensifican el desencadenamiento de la corrosión de la armadura en el hormigón celular, utilizando losas con masas específicas ligeras. La metodología se basó en cuatro pruebas: inspección visual, potencial de corrosión, resistividad eléctrica y pérdida de masa. En relación con la familia L1, las familias L2 y L3 (mayor contenido de aire) se mostraron más susceptibles a la corrosión de las armaduras, así como en la cantidad de masa perdida de las barras de acero en el 90% de los casos. Sin embargo, el comportamiento de algunas losas indica que existe la posibilidad de que el proceso sea asintomático en cuanto a la mancha, considerando que se verificó la influencia de la cubierta en el proceso de corrosión de las barras de acero.

En el séptimo trabajo, procedente de **México**, Alberto Mena y Pedro Castro Borges presentan el uso práctico del factor de seguridad (FS) en la estrategia de reparación de columnas en un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años). Se llevó a cabo la reparación del 80% de un edificio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Campeche, México, declarado patrimonio de la

humanidad por la UNESCO. Se utilizaron estrategias para una mejor utilización de los recursos materiales, equipamiento y mano de obra en la reparación de muros, columnas, losas y trabes. Una de las estrategias fue usar el FS teórico para calcular la profundidad de reparación sin consecuencias estructurales, pero cumpliendo la finalidad de controlar la carbonatación del concreto, y manteniendo la predicción deseada de vida de servicio.

En el octavo trabajo, procedente de **España**, David Bru y Salvador Ivorra analizan el estado actual de la cubierta de la Basílica de Santa María, Alicante, España. Este edificio data del siglo XIII y está catalogado. Para el análisis de las eflorescencias que se observan se realiza un análisis de la tipología constructiva, así como un análisis visual del estado de las mismas, describiendo las manifestaciones patológicas existentes, tanto en la zona exterior de las cubiertas, como en la zona interior de las salas bajo las mismas. Para el análisis técnico de las posibles filtraciones de la cubierta a las salas interiores de la basílica se realiza una prueba de estanquidad y la verificación a través del control de la variación de temperaturas mediante análisis termográfico. Se puede concluir la existencia y posición de filtraciones que han dañado este edificio catalogado.

El artículo que cierra la edición es de Zakaryaa Zarhri y colegas de **México**, quienes presentan un estudio bibliométrico de la literatura sobre el uso del caucho de las llantas en la construcción para promover el interés de utilizarlo como materia prima para reducir la contaminación a nivel global. Los trabajos publicados en el período 1999-2020 en ambas bases de datos Scopus y Web of Science (WoS) se tienen en cuenta utilizando el software Methodi Ordinatio y VOSviewer. En este período se han publicado un total de 967 documentos sobre el uso del caucho en hormigones estructurales y no estructurales y han contribuido 1182 autores sobre el tema. Desde 2010, ha aumentado el interés de los investigadores por introducir el caucho en la construcción. China, Estados Unidos y Australia son los países con mayor interés en investigar sobre caucho-hormigón.


En este número, por primera ocasión, se honra con un "In Memoriam" a algún científico sobresaliente a nivel internacional, que haya fallecido en fechas recientes. En esta ocasión, la sección "In Memoriam" es escrita por Carmen Andrade y Por José Bastidas para honrar a José Antonio González. Me tocó conocer en persona a José Antonio en 1993 en el CNIM de Madrid. Era una persona sumamente sencilla y de quien recuerdo momentos sumamente enriquecedores. Uno de ellos, que comentaré aquí, fué en mi primera visita, cuando en forma espontánea, didáctica y enriquecedora, me dió una clase personal de electroquímica, pero centrada en el método de Resistencia a la Polarización Lineal. Al final de la clase, me obsequió su libro autografiado sobre la lucha contra la corrosión. Siempre fuí su fan y tengo sus libros desde entonces. Quien mejor que Carmen Andrade y José Bastidas para hablar de su talla y grandeza escondida a través de una humildad y sencillez que no es tan fácil encontrar en la actualidad. Les invito a disfrutar "In Memoriam "

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de evaluaciones y

caracterizaciones de materiales, elementos y estructuras. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos.

Al inicio de 2022, debo hacer un amplio reconocimiento al cuerpo editorial original y a quienes se han ido sumando a esta iniciativa que nos ha llevado a donde estamos ahora. Pero sin duda, el mayor reconocimiento lo merecen nuestros autores de artículos, quienes han confiado en nuestra revista y han invertido tiempo, dinero y esfuerzo para publicar su trabajo de investigación con nosotros, a pesar de que muchos de ellos han tenido mejores opciones en su momento. El reconocimiento es extensivo a nuestros lectores, como tú, quienes nos leen y citan a la RA a nivel internacional.

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges

Editor en Jefe

EN MEMORIA DE

José Antonio González Fernández

(1937–2021)



José Antonio González Fernández (1937–2021), nos dejó en Mayo de 2021 después de una fructífera vida y excelente trayectoria científica dedicada a la investigación y a la formación de investigadores. Gran maestro y mejor persona, incansable investigador quien ha dedicado todo su saber y esfuerzo al avance del conocimiento científico. Ambos somos uno de los primeros y el más reciente de sus pupilos.

En mi caso (Carmen) conocí a José Antonio en el CENIM después de entrar en contacto con Sebastián Feliu. Me acababa de incorporar al Instituto Eduardo Torroja donde iba a desarrollar mi Tesis Doctoral bajo la dirección de José Calleja, el Jefe del Departamento de Química. Fue Calleja quien me sugirió como primer tema a estudiar el de la corrosión de la armadura, ya que él ya había escrito algún trabajo y le parecía de enorme importancia. Cuando lo acepté me sugirió enseguida que visitara al Dr. Feliu, Jefe del Departamento de Corrosión en el CENIM, el que me dirigió al curso que daba de doctorado en la cátedra de Metalurgia de la Universidad Complutense. José Antonio estaba entonces en Alemania especializándose en corrosión a alta temperatura. Cuando volvió al laboratorio unos meses después, Feliu me indicó que sería a él al que le debía dirigir mis preguntas. Iniciamos así una fructífera colaboración en aquellos primeros años hasta que al comienzo de los años 2000 mis responsabilidades como Presidente de organizaciones internacionales me impidieron seguir la estrecha relación que habíamos mantenido durante más de dos décadas. Tuvimos que empezar

a dirigir tesis por separado y con ello a seguir en los mismos temas, pero por caminos paralelos.

En mi caso (David), tuve el privilegio de aprender con José Antonio todo sobre Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Su excelencia científica, pasión y vocación eran adjetivos que le han acompañado y distinguido durante toda su ejemplar trayectoria científica. Quiero también agradecer la formación y rigor científico por parte de José María Bastidas, quien es un ejemplo de excelencia investigadora de la escuela de José Antonio. Durante mi etapa en el Cenim con José Antonio fuimos pioneros en el estudio de los mecanismos de corrosión y pasividad de refuerzos de aceros embebidos en cenizas volantes, estudio que ha supuesto una gran repercusión en el avance del conocimiento de la corrosión de estructuras de hormigón armado por su visión en la aplicación de geopolímeros como materiales cementantes. Además, puede aprender con José Antonio los fundamentos de la aplicación de pulsos galvanostáticos/potenciostáticos para la determinación de la resistencia de polarización a través de la constante de tiempo del proceso de relajación para la evaluación de velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado. Tuve el placer de acompañarle a Nashville, TN (USA), donde José Antonio fue galardonado con motivo del reconocimiento recibido por *NACE* Internacional con el *Frank Newman Speller Award* en 2007, premio al mérito por el que ha sido distinguido por su contribución al estudio, diagnosis y prevención de corrosión en estructuras de hormigón armado. En Memoria de José Antonio y para rendirle homenaje, este próximo año 2022, organizado por la *Association for Materials Protection and Performance (AMPP)* y presidido conjuntamente con Nick Birbilis tendrá lugar un Simposio Especial en Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado. Entre las grandes virtudes de José Antonio, destacaba su gran capacidad y generosidad en la formación de nuevos investigadores. Su gran talento ha sido un excelente ejemplo para todos nosotros y fuente de inspiración, los cuales transmitía siempre del lado del esfuerzo y tesón, sin los cuales, la reacción no alcanzaba su equilibrio.

José Antonio estaba siempre disponible para sus colaboradores y era un trabajador infatigable, voluntarioso y con mucho amor propio. En lo personal tenía un humor con mucha retranca, que a veces no era fácil captarle, pero que resultaba siempre preciso, oportuno, e inteligente.

Las grandes aportaciones de José Antonio a la ciencia de la corrosión han sido muy destacadas por su alcance internacional, donde ha cultivado extensas y estrechas relaciones que han contribuido a formar grandes investigadores en el marco internacional, siendo un referente en los países Iberoamericanos. Siempre, desde el Departamento de Corrosión del CENIM (CSIC), donde se jubiló hace unos pocos años. Además de sus estudios sobre el inoxidable que luego extendió al caso de las armaduras de este metal en el hormigón son muy importantes sus aportaciones en el uso de técnicas electroquímicas. Entre ellas hay que mencionar los trabajos con Feliu, Fullea y Andrade sobre la aplicación de la medida de la Resistencia de Polarización (R_p) tanto en ácido sulfúrico/plomo como en hormigón, resultando ambos avances de inmediato reconocimiento internacional, en unos años en que el uso de esta manera de medir la velocidad de corrosión era muy cuestionada. La verificación gravimétrica de las pérdidas electroquímicas, verificación importada de los estudios de corrosión atmosférica donde solo se median pérdidas de peso, fueron un hito crucial para dar un paso de gigante en la demostración de la fiabilidad de la técnica. La extensión del uso de la técnica de la R_p a estructuras de hormigón de gran tamaño se debe a un impulso inicial de Feliu, que logró resolver la ecuaciones matemáticas involucradas y fue quien sugirió el empleo de un anillo de guarda, pero estas ideas no hubieran sido posibles sin el infatigable trabajo de Jose Antonio entre otros para dar a luz un corrosímetro portátil de medida de la velocidad de corrosión con la empresa Geocisa y el Instituto Torroja, que todavía hoy sigue siendo el más exacto de los comercializados.

En el hormigón, José Antonio estudió con ahínco muchos aspectos de la corrosión de la armadura como fue el efecto de la temperatura, el empleo de inhibidores, la aplicación de la impedancia

electroquímica, el uso de armaduras inoxidables, la realcalinización y la extracción de cloruros y un largo etc. En otras áreas contribuyó en las áreas del Departamento de Corrosión, como eran la pasivación del inoxidable en medios ácidos, la del aluminio y su anodización, o la corrosión atmosférica.

Es muy de destacar los libros que escribió sobre diversos temas de corrosión, el uso de las técnicas electroquímicas o la corrosión de las armaduras. Estos libros son testimonio de su capacidad docente y su meticulosidad y rigor.

Por sus trabajos recibió, entre otros, el premio de la NACE “Frank Newman Speller Award” en 2007 *for this valuable contribution to corrosion monitoring, diagnosis, and prevention of reinforced concrete Structures*”. Eligió como conferencia el tema “*Prediction of Reinforced Concrete Structure Durability by Electrochemical techniques*” que se publicó en *Corrosion* 63, 9 (2007): p. 811-818.

Compañero de viajes a congresos, de largas horas midiendo potenciales y corrientes en el laboratorio y de interminables discusiones científicas, descansa en paz. Tus enseñanzas servirán para varias generaciones que te deben tributo por tu vocación investigadora, intuición científica, capacidad de diseñar ensayos complejos, rigor en el análisis de los resultados y sobre todo dedicación, mucha dedicación a todos tus colaboradores.

En memoria de José Antonio González, grande entre los grandes, gracias por todo el conocimiento y saber hacer que nos has enseñado y transmitido. Te echaremos mucho de menos. Sirva esta memoria para expresar nuestras más sinceras condolencias a toda su familia, su esposa Mari Luz, su hijo José Severo, y a sus hijas Paloma, Mari Nieves, y Susana.

Por Carmen Andrade* y David M. Bastidas**

* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)- Madrid- España

** National Center for Education and Research on Corrosion and Materials Performance, NCERCAMP-UA, Dept. Chemical, Biomolecular, and Corrosion Engineering, The University of Akron, United States



CONTENIDO

INVESTIGACIÓN BÁSICA

Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E.: Vida de fatiga del hormigón: estudio experimental sobre la influencia de las condiciones de carga y la resistencia del material.

Página

1 - 15

Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M.: Activadores alternativos para cementos de activación alcalina.

16 – 31

Pacheco, F., Loeff, A., Müller, V., Ehrenbring, H. Z., Christ, R., Modolo, R. C. E., Oliveira, M. F., Tutikian, B. F.: Análisis de la autorregeneración de matrices cementosas mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas.

32 – 46

Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M.: Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón a partir de modelos que estiman el avance del frente de carbonatación.

47 – 60

Malaquias, R. H., Bruschi, G. J., Brisotto, D. S.: Análisis del rendimiento de bloqueadores químicos por gravedad en el tratamiento de la humedad ascendente en muros de mampostería.

61 – 75

Nascimento, C. F. G., Demétrio Filho, A. A., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Neves, D. C. M., Monteiro, E. C. B.: Influencia del porcentaje de vacíos del concreto celular en la corrosión del acero de refuerzo.

76 – 97

CASO DE ESTUDIO

Briceño-Mena, J. A., Castro-Borges, P.: Uso práctico del factor de seguridad en la estrategia de reparación de columnas de un edificio de concreto con valor histórico.

98 – 109

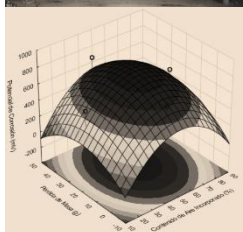
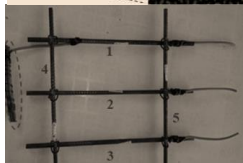
Bru, D., Ivorra, S.: Estudio termográfico de las manifestaciones patológicas por humedades y del estado de conservación de la cubierta de la Basílica de Santa María.

110 – 126



INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Zarhri, Z., Rosado Martinez, W., Dominguez Lepe, J., Vega Azamar, R. E., Chan Juarez, M., Pamplona Solis, B.: 30 años de investigaciones sobre concreto con caucho (1990-2020). Un análisis bibliométrico.

127 – 142



Vida útil a la fatiga del hormigón: estudio experimental de la influencia de las condiciones de carga y resistencia del material

E. F. Felix^{1*} , R. Carrazedo¹ , E. Possan² 

* Autor de Contacto: autor.contacto@email.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.562>

Recibido: 31/10/2021 | Aceptado: 07/12/2021 | Publicado: 01/01/2022

RESUMEN

El presente trabajo presenta una investigación experimental con el objetivo de evaluar la influencia de la frecuencia de los esfuerzos, el nivel de tensión aplicada y la resistencia a la compresión del material sobre el comportamiento a fatiga del hormigón. Los ensayos se realizaron considerando tres frecuencias de carga (0,125, 0,25 y 0,5 Hz), dos niveles de tensión máxima (50% y 70% de la resistencia a la compresión) y hormigones con tres clases de resistencia a la compresión (30, 50 y 70 MPa). Los resultados encontrados indican que a medida que aumenta la frecuencia de carga, la vida en condiciones de fatiga aumenta exponencialmente. Sin embargo, se observó que la vida en condiciones de fatiga es menor en los hormigones de alta resistencia a la compresión, y presenta una relación inversa con la resistencia a la compresión del material.

Palabras clave: hormigón; compresión cíclica; fatiga; fatiga de bajo ciclo; vida útil a fatiga.

Citar como: Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2022), "*Vida útil a la fatiga del hormigón: estudio experimental de la influencia de las condiciones de carga y resistencia del material*", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 1 – 15, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.562>

¹ University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, Brazil.

² Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

Contribución de los autores

En este trabajo, Felix, E. F contribuyó con la actividad de diseño y redacción del texto (100%), la experimentación (100%), la recogida de datos (100%) y la discusión de los resultados (50%). Carrazedo, R. cooperó con la actividad de adquisición de fondos para la investigación (100%), la supervisión (100%), la discusión de los resultados (25%) y la corrección y redacción del texto (50%). Possan, E. contribuyó con la actividad de discusión de los resultados (25%) y la revisión del texto (50%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Fatigue life of concrete: Experimental study on the influence of loading conditions and material strength

ABSTRACT

This work presents an experimental investigation aiming to evaluate the influence on the concrete fatigue behavior regarding the loading frequency, load intensity and the material's compressive strength. Tests were carried out considering three loading frequencies (0.125, 0.25 and 0.5 Hz), two levels of maximum stress (50% and 70% of the compressive strength) and concretes made with three different compressive strength (30, 50 and 70 MPa). The results point out that as the loading frequency is increased, the fatigue life increases exponentially. However, it was observed that the fatigue life is shorter in high-strength concretes, i.e., the fatigue life presented an inverse relationship with the compressive strength.

Keywords: concrete; cyclic compression; fatigue; low cycle fatigue; fatigue life.

Vida útil à fadiga do concreto: Estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma investigação experimental com objetivo de avaliar a influência da frequência de carregamento, intensidade da carga e resistência à compressão do material, no comportamento à fadiga do concreto. Ensaios foram realizados considerando três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz), dois níveis de tensão máxima (50% e 70% da resistência à compressão) e concretos com três classes de resistência (30, 50 e 70 MPa). Os resultados encontrados apontam que à medida que a frequência de carregamento é aumentada, a vida útil à fadiga cresce exponencialmente. No entanto, observou-se que a vida útil à fadiga é menor em concretos de alta resistência e que a VUF apresentou uma relação inversa com a resistência à compressão.

Palavras-chave: concreto; compressão cíclica; fadiga; fadiga de baixo ciclo; vida útil à fadiga.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón/concreto suelen ser proyectadas bajo las hipótesis de que las cargas que actuarán a lo largo de su vida útil serán estáticas y que los elementos estructurales trabajan en régimen elástico lineal (o con un bajo nivel de deterioro). Sin embargo, las solicitaciones cíclicas, como la acción del viento, las mareas, los temblores sísmicos, los efectos de la temperatura y otras cargas fluctuantes (como el tráfico de vehículos en un puente), pueden provocar una avería en la estructura bajo niveles de tensión inferiores a los establecidos en el proyecto, y eso ocurre a causa del fenómeno de la fatiga (Lü et al., 2004; Saini y Singh, 2020).

La fatiga se refiere al deterioro o ruptura de un sólido cuando se somete a cargas y descargas repetidas, y se produce debido a la degradación permanente y progresiva en la microestructura del material para tensiones cíclicas de magnitud inferior a su resistencia (Saini y Singh, 2020). Por ello, la fatiga es un fenómeno que debe ser considerado en el proyecto de elementos que trabajan bajo la acción de cargas cíclicas, de manera que se minimicen los daños permanentes que comprometen la integridad estructural.

En general, el nivel de tensión, que actúa sobre el material, es de suma importancia en el análisis y definición de la resistencia a la fatiga, o vida útil (número de ciclos N , soportados antes de la ruptura). El número N , puede describirse a través de la curva de Wöhler, o curva S_xN "Stress vs. Number", que relaciona el nivel de esfuerzo aplicado con el número de ciclos que provocan la ruptura en el material. Para la mayoría de los materiales, la curva de Wöhler muestra la existencia de una tendencia en la reducción del número de ciclos a medida que aumenta el nivel de tensión (Dowling, 2012).

Actualmente, solo los materiales dúctiles, como el acero y las aleaciones, presentan ábacos y curvas de Wöhler bien definidas. En el caso del hormigón y otros materiales frágiles y casi frágiles, todavía no existen curvas definidas para todas las clases y tipos, ya que el desarrollo de la investigación relacionada con la fatiga solamente ha cobrado importancia en las dos últimas décadas, mientras que los estudios relacionados con las áreas de durabilidad, mecánica de la fractura y mecánica del daño han avanzado sustancialmente.

En cuanto al comportamiento del hormigón cuando sometido a cargas cíclicas, se han desarrollado trabajos mediante estudios teóricos, experimentales y/o numéricos, y se han dividido en cuanto al tipo de fatiga analizada: fatiga por tracción (Subramaniam y Shah, 2003; Chen, et al, 2017), tracción-compresión (Lü et al., 2004), compresión (Xiao et al., 2013; Lantsoght et al., 2016; Jiang et al., 2017) y flexión (Kim et al., 2013; Arora y Singh, 2016; Kasu et al., 2019; Saiani y Sinsh, 2020). La mayor parte de las investigaciones encontradas en la literatura están dirigidas a evaluar la fatiga a la flexión, donde los esfuerzos de tracción son preponderantes.

En Brasil, por ejemplo, las investigaciones están relacionadas principalmente con la fatiga por flexión en vigas o con la compresión y flexión en pavimentos de hormigón, siendo la mayoría (de las investigaciones) de carácter numérico o teórico-numérico (Baroni, 2010; Junges, 2017; Mascarenhas y Carvalho, 2019).

La principal dificultad encontrada en el estudio experimental del comportamiento de la fatiga del hormigón en Brasil está relacionada con la falta de equipos capaces de realizar ensayos cíclicos con alta velocidad de carga. Medeiros (2012), por ejemplo, ejecutó parte de su investigación en el extranjero, debido a la falta de disponibilidad, en ese momento, de máquinas y equipos de laboratorio para los ensayos de fatiga por compresión. El autor analizó experimentalmente la ganancia de resistencia a la fatiga debida a la incorporación de fibras en la matriz cementante del hormigón, comprobando también la influencia de diferentes frecuencias de carga.

A partir de ese despliegue, este trabajo tiene como objetivo investigar el comportamiento a la fatiga del hormigón con el fin de analizar la vida útil a la fatiga (VUF) de los concretos de baja (30 MPa), y alta (50 y 70 MPa) resistencia a la compresión, sometidos a diferentes condiciones de carga. El

estudio experimental se desarrolló considerando la compresión cíclica, donde los ensayos se realizaron combinando tres frecuencias de carga (0.125, 0.25 y 0.5 Hz) y dos niveles de tensión máxima (50% y 70% de la resistencia a la compresión).

2. FATIGA EN EL HORMIGÓN

2.1 Degradación del material por la carga cíclica

En un cuerpo sometido a cargas cíclicas, las nucleaciones a nivel microscópico se originan con un bajo número de repeticiones debido al efecto de la fatiga en el material. La progresión de las grietas hasta su observación a nivel macroscópico es lenta, si se considera la vida a fatiga del sólido, normalmente expresada por el número de ciclos necesarios para provocar el fallo del material (N_f). La vida útil a la fatiga (VUF) se clasifica generalmente en dos etapas: una referida a la aparición de nucleaciones en el material y otra a la propagación de grietas. En el periodo de iniciación también se observa el crecimiento microestructural de las grietas, sin embargo, en dimensiones tan insignificantes que no son consideradas en la representación o cuantificación del nivel de daño del material. A la vez, el periodo de propagación puede caracterizarse por el periodo que se refiere al desarrollo de las grietas a nivel mesoscópico. La figura 1 exhibe las diferentes fases que configuran la vida útil a la fatiga, considerando aspectos relacionados con el agrietamiento del material.

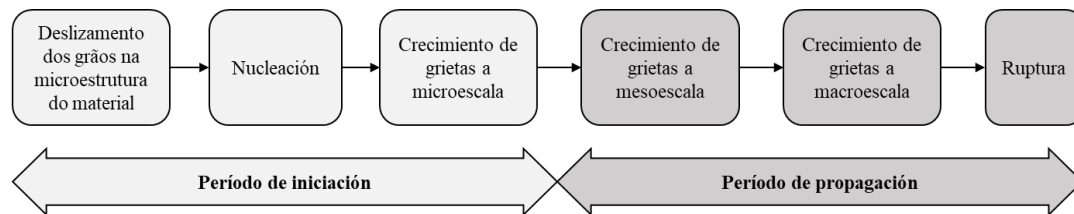


Figura 1. Etapas de la VUF asociadas al agrietamiento del concreto.

Desde la aparición de la primera microfisura hasta la ruptura del material, el daño por fatiga en el hormigón puede caracterizarse en tres etapas (Figura 2): (i) origen de la grieta, o sea, cuando la microfisura aparece a causa de la alta concentración de tensiones en puntos de discontinuidad en la estructura cristalina o, en regiones con discontinuidades preexistentes en el material; (ii) propagación de la grieta, por consecuencia de la acumulación de energía en las extremidades de las grietas existentes; y (iii) ruptura del material, que sucede de manera abrupta, debido a la naturaleza casi-frágil del material.

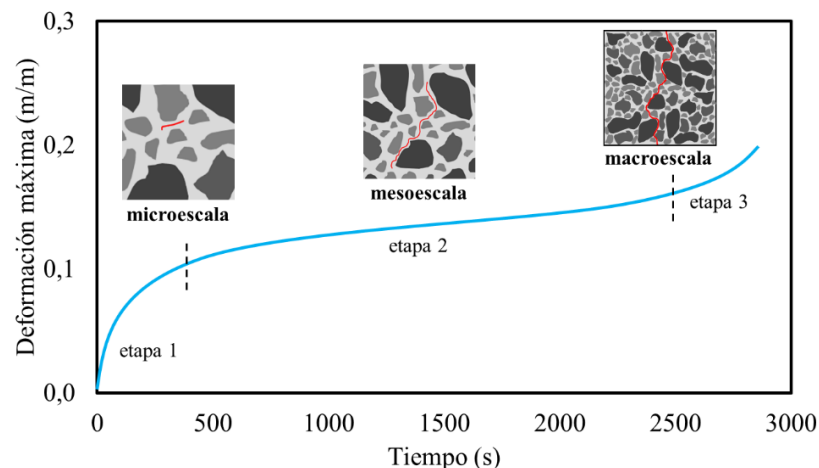


Figura 2. Progresión de agrietamiento del concreto en función de la deformación máxima y del tiempo de ensayo en los cuerpos de prueba sometidos a cargas cíclicas.

Para predecir o supervisar la vida útil de un elemento de concreto cuando se somete a fatiga, es necesario conocer el comportamiento mecánico del material cuando se somete a ciclos de carga y descarga. Las propiedades del concreto relacionadas con la fatiga se determinan a partir de ensayos de laboratorio, en los que los datos obtenidos suelen presentarse mediante un gráfico de la tensión o la deformación específica en función del número de ciclos hasta el rompimiento, curva S-N y ϵ -N, respectivamente.

Existen varios modelos en la literatura para predecir la vida a la fatiga del hormigón, como se presenta en las ecuaciones (1)-(3) (Wöhler, 1960; Raithby y Galloway, 1974; Tepfers y Kutti, 1979). Sin embargo, la mayoría de los modelos tienen como directrices las curvas S-N o ϵ -N, obtenidas en campañas experimentales, que solo funcionan con un número reducido de casos, lo que hace inviable su empleo de manera generalizada.

$$\frac{S_{max}}{f_{t,f}} = d + e \log(n) \quad (\text{WÖHLER, 1960}) \quad (1)$$

$$\log(N) = 13,275 - 11,39 \left(\frac{S_{max}}{f_{ck}} \right) \quad (\text{RAITHBY; GALLOWAY, 1974}) \quad (2)$$

$$\frac{S_{max}}{f_{est}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log(N) \quad (\text{TEPFERS; KUTTI, 1979}) \quad (3)$$

S_{max} es la tensión máxima aplicada, $f_{t,f}$ es la resistencia a la tracción en la flexión estática del hormigón, N es el número de ciclos para el colapso del material, d y e son parámetros del material obtenidos por regresión de los datos, R es la relación entre la tensión mínima y la máxima, f_{ck} es la resistencia característica del hormigón, f_{est} es la resistencia bajo análisis (tracción, compresión o flexión) o tracción estática del hormigón.

Según Lee y Barr (2004), son muchas las razones que hacen inviable el uso de la curva de Wöhler (Ecuación (1)) de forma generalizada, siendo la principal la determinación de los parámetros a través de la regresión de datos, ya que existe una considerable dispersión en los resultados de los ensayos de fatiga del hormigón, considerando muestras del mismo lote, bajo las mismas condiciones de ensayo.

Ortega et al. (2018) informan que la gran dispersión en los resultados es consecuencia de la sensibilidad de la resistencia a la fatiga a una variedad de parámetros relacionados con el ensayo y el material, que son casi imposibles de controlar con precisión, como las condiciones de moldeo, la alineación del cuerpo de prueba en el equipo de ensayo, la imposición de las tensiones máximas y mínimas, la frecuencia de cargamento y el posicionamiento de los extensómetros o Strain Gauges.

2.2 Factores que intervienen en la vida útil a la fatiga

El estudio de la fatiga del hormigón tuvo sus primeras publicaciones a mediados de la década de 1920, con la publicación de Clemmer (1922), donde se observó que el hormigón tiene un comportamiento distinto al del acero cuando se somete a un cargamento cíclico, señalando que este mecanismo de degradación se correlacionaba con los principios de la mecánica de la fractura.

A lo largo de los últimos cien años, tras la publicación de los primeros trabajos, se han desarrollado numerosos estudios sobre la fatiga en el hormigón, cuya mayoría de ellos (hasta los años 90) se refieren a la determinación de un modelo general, que consideraba los diferentes tipos de ensayos a la fatiga: tracción directa, tracción a flexión, tracción a compresión, compresión y tracción-compresión alternada.

Según Medeiros (2012), el modo de carga influye en el comportamiento del concreto hasta su fatiga, ya que son múltiples los factores que rigen el mecanismo de ruptura del concreto en la compresión, tracción o flexión. Además, se sabe que otros parámetros pueden influenciar la

resistencia a la fatiga y vida útil, como los materiales constitutivos, las condiciones de humedad, la relación entre las tensiones mínimas y máximas (R), la frecuencia de carga, entre otros.

Raithby y Galloway (1974) analizaron la influencia de las condiciones de humedad en la determinación del número de ciclos hasta la ruptura del hormigón convencional. Los autores analizaron las condiciones del hormigón saturado, del hormigón secado al aire durante una semana (Ecuación (2)) y del hormigón secado al horno durante una semana. Los resultados encontrados coinciden con los observados por Cornelissen y Lewis (1986), donde el hormigón saturado presenta una vida útil más corta que el hormigón secado al aire, pero prácticamente igual que el hormigón secado al horno.

Tepfers y Kutti (1979) propusieron modelos para determinar la vida útil del hormigón sometido a fatiga por compresión, tracción y flexión, verificando mediante análisis estadístico que la Ecuación (3) responde a los diferentes tipos de carga. Sin embargo, Cornelissen (1984) presentó un estudio que demostraba que el modo de carga influye en el comportamiento del concreto a su fatiga, indicando que un único modelo no representaría adecuadamente el fenómeno para diferentes tipos de carga. Además, Cornelissen (1984) y Zhang et al. (1996) verificaron que los ensayos con alternancia provocan una mayor reducción en la resistencia a la fatiga que los ensayos únicamente en tracción en la flexión.

En cuanto a los materiales constituyentes, aún no se ha llegado a un consenso sobre la influencia de la relación agua/cemento (a/c) y del consumo de cemento. Tepfers y Kutti (1979) y Zhang et al. (1997) muestran que estos parámetros son indiferentes al comportamiento del hormigón sometido a fatiga por tracción o flexión, afectando únicamente a la resistencia estática del material.

En cuanto al tipo de árido utilizado, Sparks (1982) demostró que existe una fuerte correlación entre la tasa de deformación secundaria y el número de ciclos hasta la ruptura del hormigón, de modo que los concretos producidos con agregados finos tienen una vida útil más corta en comparación con los concretos con agregados convencionales (agregados de origen basáltico o granítico).

Por último, se sabe que la frecuencia de carga (f) puede tener una gran influencia en el comportamiento a la fatiga del hormigón, y aún más, se sabe también que, al aumentar la frecuencia, la vida útil a la fatiga aumenta. Sin embargo, la mayoría de los trabajos existentes en la literatura que corroboran esta afirmación fueron desarrollados para altas frecuencias ($f > 1.0$) y para tensiones máximas que varían entre el 75% y el 95% de la resistencia estática (Zhang et al., 1996). Jansen (1996) observó que para tensiones máximas inferiores al 75% de la resistencia estática del hormigón, las frecuencias entre 1 y 15 Hz tienen poca influencia en la resistencia a fatiga, y más, se sabe que una reducción de 100 veces en la frecuencia resulta en una reducción de 10 a 30 veces en el número de ciclos.

3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La metodología utilizada en este trabajo se define en cinco etapas cuyo objetivo se centra en la evaluación de la vida útil a la fatiga de cuerpos de prueba cilíndricos bajo compresión cíclica.

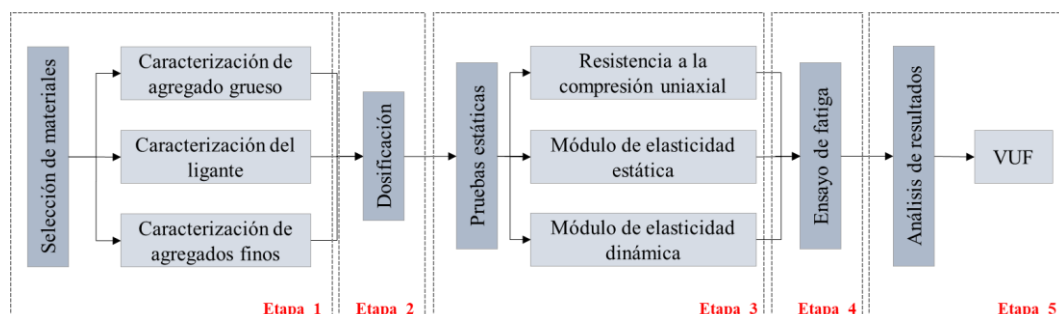


Figura 3. metodología de trabajo.

Las cinco actividades desarrolladas en el trabajo se presentan en la Figura 3 y se refieren a: i) selección y caracterización de los materiales; ii) dosificación y moldeo del hormigón; iii) ensayos para definir las propiedades mecánicas del material; iv) ensayo de fatiga por compresión; y v) análisis de los resultados obtenidos. Cada una de estas actividades se describe en detalle a continuación.

3.1 Selección y caracterización de materiales

En este estudio, para la producción de hormigón, se utilizó como ligante el cemento Portland CP II Z 32, compuesto con puzolana y con 32 MPa de resistencia a la compresión. La masa específica (3.06 g/cm³) y la superficie específica (3965.00 cm²/g) de este cemento se determinaron según la NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) y la NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente.

Se utilizaron arena de cuarzo y grava 0 de origen basáltico como agregados finos y gruesos, respectivamente. Para la caracterización de los agregados (Tabla 1), se realizaron las pruebas de composición granulométrica, masa específica, masa unitaria, absorción de agua y módulo de finura. En cuanto a la composición granulométrica del agregado fino, se constató que los dos lotes analizados se ajustan a los límites granulométricos recomendados por la NBR 7211 (ABNT, 2009) para la arena fina. En cuanto a los agregados gruesos, los resultados demostraron el tamaño máximo característico de 9,5 mm, correspondiente a la grava 0.

Tabla 1. Caracterización física de los agregados.

Propiedades	Agregado fino	Agregado grueso	Normas utilizadas
Massa unitaria (kg/m ³)	1390.00	1401.00	(NBR NM 45: 2006)
Massa específica (kg/m ³)	2520.00	2590.00	(NBR NM 53: 2003)
Absorción (%)	0.22	1.45	(NBR NM 53, 2003)
Módulo de finura	1.46	-	(NBR NM 248 2003)

Para los hormigones de la clase C50 y C70, fue necesario emplear aditivos superplastificantes, que están compuestos por polímeros orgánicos, comúnmente usados como reductores de agua, que permiten reducir el factor agua/cemento y dispersar las partículas de cemento, mejorando así la fluidez de las mezclas.

Por último, hay que relatar que en todos los hormigonados se utilizó agua potable de la red de suministro local, por lo que no fue necesario controlar su aceptación.

3.2 Dosificación y producción de hormigón

Para la definición del programa experimental, se produjeron concretos considerando tres composiciones diferentes, siendo una para un hormigón convencional de baja resistencia, con resistencia característica a la compresión igual a 30 MPa (C30) y dos para hormigones de alta resistencia, con 50 (C50) y 70 MPa (C70).

Para la dosificación se utilizó el método ABCP (Rodrigues, 1984) con un asentamiento fijado en (120 ± 20) mm. Las dosificaciones iniciales se hicieron para que la composición de los materiales proporcionara un concreto con las resistencias deseadas. La tabla 2 muestra el consumo de materiales para cada una de las dosificaciones producidas.

En total, se produjeron 126 cuerpos de prueba cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, 42 cuerpos de prueba para cada uno de los tres lotes. Los hormigones se moldearon en una mesa vibratoria y se sometieron a un curado con temperatura y humedad controladas hasta el momento de los ensayos, a los 28 y 90 días.

Tabla 2. Consumo de materiales.

Material	Consumo de materiales en kg/m ³		
	C30	C50	C70
Cemento (CP II Z 32)	353.96	395.55	553.43
Agregado fino	800.44	1000.76	853.92
Agregado grueso	1023.68	819.96	826.75
Agua	184.19	166.37	168.92
Aditivo	-	2.38	4.41
Relación agua/cemento	0.52	0.42	0.30

3.3 Ensayos con cargas estáticas

Para los ensayos de caracterización del hormigón con cargamento estático, se utilizaron dieciocho cuerpos de prueba, de los cuales seis fueron empleados en los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días, seis a los 28 días, seis para el análisis de resistencia y determinación del módulo de elasticidad estático y dinámico a los 90 días (período en el que ocurrieron los ensayos de compresión cíclica). Los ensayos se realizaron de acuerdo con las normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 8522 (ABNT, 2017) y ASTM E1876 (2015).

En este trabajo se ha considerado el módulo de elasticidad dinámico porque es una propiedad que representa el comportamiento del hormigón cuando se somete a cargas dinámicas. Los ensayos de módulo de elasticidad dinámico se realizaron mediante la técnica de excitación por impulsos (TEI), una técnica no destructiva, que permite utilizar el cuerpo de prueba en otro ensayo. Este ensayo se realizó con el fin de determinar la variación del módulo de elasticidad y el daño correspondiente, evaluado durante la prueba de fatiga.

El módulo de elasticidad dinámico y su respectivo módulo estático, obtenidos mediante la formulación de Popovics (2008) (Ecuación (4)), se midieron en seis cuerpos de prueba antes del inicio de los ensayos de resistencia a la compresión a los 90 días.

$$E_c = 0,107E_d^{1,4}\rho^{-1} \quad (4)$$

E_c es el módulo de elasticidad estático (en Pa), ρ es la densidad del hormigón (en kg/m³), E_d es el módulo de elasticidad dinámico (en Pa).

3.4 Ensayos de fatiga

Para los ensayos de fatiga se usaron cuerpos de prueba cilíndricos de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro, sometidos a compresión cíclica en una máquina servohidráulica Instron 8805 con capacidad máxima de ± 1500 kN. La elección de los cuerpos de prueba se hizo buscando una dimensión en la cual la velocidad máxima de carga utilizada en los ensayos fuera inferior a la velocidad máxima soportada por la máquina (80 kN/s) y que aún representara adecuadamente el comportamiento del material. Como justificación del tamaño del cuerpo de prueba, se indica el estudio experimental realizado por Saini et. al. (2015) que observó que, para la fatiga por compresión, el diámetro del cuerpo de prueba tiene influencia superior a la relación altura/diámetro del cuerpo de prueba y que un diámetro igual o superior a 5 cm es suficiente para evaluar y/o ensayar cuerpos de prueba de concreto bajo compresión cíclica. Saini et. al. (2015) informan aún que hay que utilizar un cuerpo de prueba con una relación entre el diámetro del cuerpo de prueba y el diámetro máximo del agregado superior a 5.

La máquina servohidráulica usada tiene un control electrónico que recibe señales analógicas de hasta seis canales diferentes, ya sea de carga, desplazamiento o lectura de una galga extensométrica.

La figura 4.a muestra una vista general de la posición de dos galgas extensométricas del tipo doble roseta (con direcciones que varían en 90°) y dos LVDTs, utilizadas en los cuerpos de prueba. Ya en la figura 4.b se enseña el esquema de carga cíclica empleada.

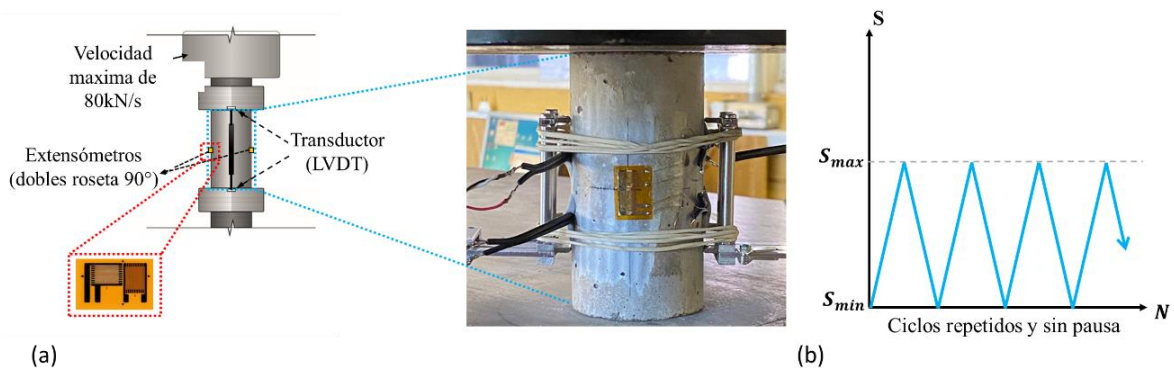


Figura 4. Esquema (a) de la instrumentación y (b) de la carga cíclica.

Los ensayos de fatiga se configuraron mediante el control de la carga. Como se presenta en la Figura 4.b, la definición de las cargas máximas y mínimas se realizó considerando dos configuraciones distintas, una para la carga máxima del 50% de la resistencia a la compresión (f_c) y otra para el 70% de f_c , considerando en ambos casos, una carga mínima de 0 kN, lo que configura relaciones entre la tensión mínima y máxima (R) de 0 para ambos casos.

Se analizaron cuatro cuerpos de prueba para determinar el número medio de ciclos, necesarios para la ruptura por fatiga en compresión, para los dieciocho casos estudiados. Los dieciocho casos se refieren a la combinación de tres frecuencias de carga (0.125, 0.25 y 0.5 Hz), dos niveles de tensión máxima (50% y 70% f_c) y tres clases de resistencia a la compresión (30, 50 y 70 MPa).

Para facilitar la lectura de los resultados, se utilizó la nomenclatura C#S#F#, donde C# se refiere a la clase de resistencia del hormigón (C30 para 30 MPa, C50 para 50 MPa o C70 para 70 MPa), S# se refiere a la tensión máxima adoptada (S5 para el 50% y S7 para el 70%) y F# describe la frecuencia de carga (F125 para 0.125 Hz, F25 para 0.25 Hz y F5 para 0.5 Hz).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización

La caracterización de las propiedades mecánicas de los hormigones empleados en el estudio experimental se realizó mediante ensayos de resistencia a la compresión del concreto (f_c), módulo de elasticidad estático (E_c) y módulo de elasticidad dinámico (E_d).

En cuanto a la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, se realizaron ensayos de compresión estática en seis cuerpos de prueba para cada una de las dosificaciones. Los ensayos se realizaron a los 7, 28 y 90 días, en los que el hormigón permaneció en curado con la temperatura y la humedad controladas a 25°C y 75%, respectivamente. En la figura 5.a se presenta la resistencia media a la compresión de los concretos, considerando los tres períodos de tiempo evaluados. Las áreas sombreadas del gráfico representan el rango de valores referentes a la media \pm desviación estándar de la muestra.

En la Figura 5.b se presentan los promedios de los resultados obtenidos para todas las propiedades mecánicas evaluadas en 90 días. Los datos se ordenaron de forma que se indicara la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico. Además, se presentan los desvíos estándar de las propiedades evaluadas.

Los resultados de la caracterización de las propiedades mecánicas indican que los concretos dosificados presentan una resistencia a la compresión media, a los 28 días, adecuada a la clase de

resistencia para la que fueron dosificados, siendo las resistencias medias de 35.35 MPa para la dosificación C30, 53.21 MPa para la dosificación C50 y 73.74 MPa para la dosificación C70.

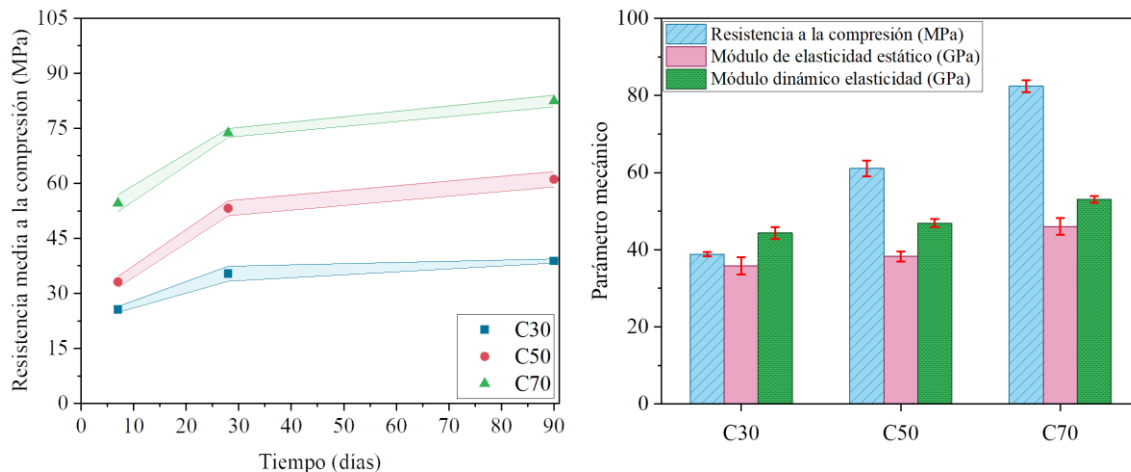


Figura 5. Medias y desviaciones de (a) la resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días, y (b) la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático y dinámico a los 90 días.

En cuanto al módulo de elasticidad estático, se observó una pequeña variación de su valor al variar la resistencia a la compresión del material. Este resultado corrobora los estudios realizados por Vasconcellos (2018) y Graeff y Prudêncio Jr. (2016), donde se ha comprobado mediante estudios experimentales que un cambio significativo en la resistencia a la compresión del hormigón no configura necesariamente un cambio significativo en el valor del módulo de elasticidad, siendo importante evaluar otros parámetros, como la relación agua/cemento, el contenido de pasta de cemento y la proporción de agregados y pasta.

Con el propósito de analizar los valores obtenidos para el módulo estático y dinámico, se utilizó la Ecuación (4) para evaluar si el módulo de elasticidad estático, obtenido experimentalmente, se aproximaba al módulo de elasticidad estático estimado por el módulo dinámico. Aplicando la Ecuación (4), para los concretos C30, C50 y C70, se obtuvieron módulos estáticos iguales a 35.50, 39.27 y 45.65 GPa, respectivamente, mientras que los valores experimentales medios fueron 35.84, 38.29 y 46.05 GPa. La diferencia porcentual entre los valores obtenidos en la predicción y los medidos experimentalmente fue de 0.94, 2.55 y 0.86% para los concretos C30, C50 y C70, respectivamente. Este resultado denota el nivel de precisión de la Ecuación (4) en la predicción del módulo de elasticidad estático del hormigón, considerando los resultados obtenidos mediante la Técnica de Excitación por Impulsos (TEI).

4.2 Vida útil a la fatiga

Dados los diferentes escenarios de carga considerados en la campaña experimental, y considerando las propiedades mecánicas medidas y mostradas en las Figuras 5.a y 5.b, las Figuras 6-8 presentan el número de ciclos (VUF) que cada una de las cuatro muestras ensayadas, por compresión cíclica, resistió antes de suceder la ruptura. Los resultados se ordenaron para presentar el número de ciclos necesarios para provocar el fallo de cada uno de los cuatro cuerpos de prueba (VUF) y la media de los valores obtenidos en cada lote de muestreo (línea roja). En los gráficos también se representan recuadros que contienen los percentiles primero y tercero.

Con el propósito de evaluar la viabilidad de los modelos clásicos para predecir la vida útil a la fatiga del hormigón, se emplearon las Ecuaciones (2) y (3) para estimar la VUF de los hormigones analizados en este trabajo. Los resultados obtenidos se compararon con los observados experimentalmente.

Aplicando la Ecuación (2), la VUF predicha fue de 38 millones de ciclos para el hormigón sometido a la tensión máxima del 50% de f_c , y de 200 mil ciclos para el hormigón sometido a la tensión máxima del 70% de f_c , siendo estos valores muy superiores a los resultados mostrados en las Figuras 6-8. Ya usando la Ecuación (3), el VUF predicho fue inferior al valor obtenido por la ecuación (2), y se calculó un VUF de 19 millones de ciclos para el hormigón sometido a la tensión máxima del 50% de f_c , y de 23 mil ciclos para el hormigón sometido a la tensión máxima del 70% de f_c , resultado también muy superior a los obtenidos experimentalmente. Cabe mencionar que los resultados obtenidos por las formulaciones no dependen de la clase de resistencia del material y tampoco de las condiciones de cargamento.

Así, los resultados obtenidos por las Ecuaciones (2) y (3) denotan la importancia de estudiar el comportamiento y la vida útil a la fatiga del hormigón sometido a cargas cíclicas, con la finalidad de entender mejor el comportamiento del material y proponer modelos que incorporen en sus formulaciones parámetros relacionados a las condiciones de carga y de rigidez del material.

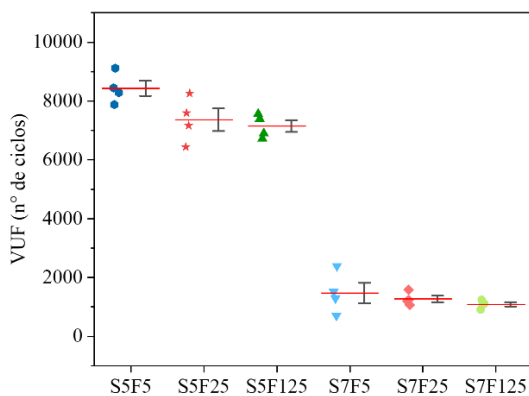


Figura 6. VUF de los concretos C30.

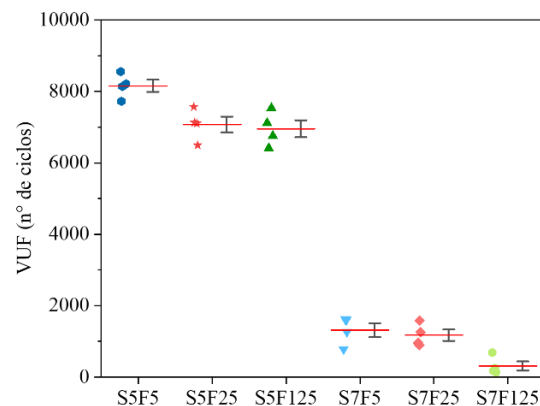


Figura 7. VUF de los concretos C50.

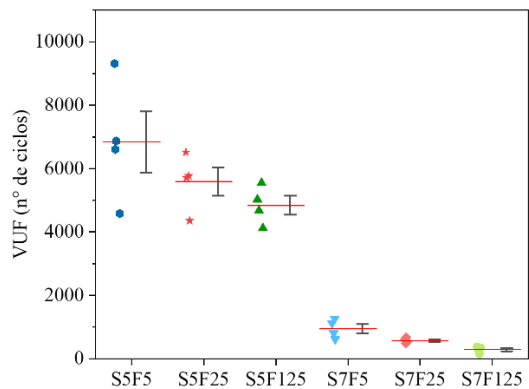


Figura 8. VUF de los concretos C70.

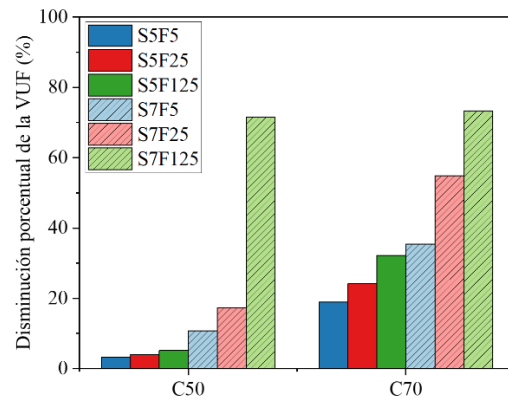


Figura 9. Variación de la vida útil a la fatiga de los concretos C50 y C70 con relación al C30.

Evaluando la Figura 6-8, es posible observar que incluso para bajas frecuencias ($f < 1,0$), el número de ciclos necesarios para llevar los cuerpos de prueba a su ruptura disminuye a medida que la frecuencia de carga disminuye, comportamiento que también se observa en los trabajos de Zhang et al. (1996) y Medeiros (2012). Además, se observa que este comportamiento se presenta independientemente del nivel de tensión máxima aplicada (50% o 70% de f_c), a diferencia de lo observado por Jansen (1996), donde el autor reporta una pequeña o casi inexistente influencia de la frecuencia en la vida útil a la fatiga de hormigones con tensiones máximas inferiores al 75% de la resistencia a la compresión.

Corroborando a los resultados encontrados en este trabajo, el estudio experimental realizado por Kim y Kim (1996), señala que la vida útil a la fatiga del hormigón disminuye a medida que aumenta la tensión máxima aplicada y que esta característica es más evidente en el hormigón de alta resistencia.

Con el fin de evaluar la influencia de la resistencia a la compresión del hormigón junto con la frecuencia de carga y el nivel de tensión máxima en la resistencia a la fatiga del material, la Figura 9 muestra un gráfico que contiene la disminución porcentual de la vida útil a la fatiga (VUF) de los concretos de lotes C50 y C70, en relación con la VUF medida en los concretos de lotes C30.

Al analizar los resultados mostrados en las Figuras 6-9, se observa una relación positiva entre la resistencia a la compresión del hormigón y la vida útil a la fatiga, y esta relación es más evidente cuando se evalúa el hormigón con una resistencia superior a 50 MPa (hormigón de alta resistencia). La influencia de la resistencia a la compresión en la vida útil a la fatiga fue investigada en los trabajos de Al-Gadhib et al. (2000) y Kessler-Kramer et al. (2003), donde los autores indican que la fragilidad que adquiere el material al ganar resistencia puede estar directamente relacionada con su comportamiento a la fatiga, ya que ésta se define por la degradación del material al ser sometido a cargas cíclicas.

Considerando los resultados mostrados en la Figura 9 y considerando que los concretos de los lotes C50 y C70 presentan, respectivamente, resistencias medias superiores al 57,37% y al 112,33%, se puede inferir que la reducción de la VUF es mayor para los hormigones sometidos al mayor nivel de tensión máxima aplicada (70% de f_c), independientemente de la resistencia del material. Además, se observó que las reducciones de la VUF aumentan con la disminución de la frecuencia de la carga adoptada.

Dados los resultados presentados en esta sección, se infiere un crecimiento de la vida útil a la fatiga al aumentar la frecuencia de carga, mientras sea mantenido el mismo nivel de tensión aplicado al material. Además, se observa que este comportamiento se visualiza mejor cuando se analiza el hormigón de alta resistencia a la compresión.

Una posible justificación encontrada por Chen et al. (2017) para explicar este fenómeno se refiere a que, en la aplicación de cargas cíclicas, el hormigón deja de tener su comportamiento definido por las propiedades estáticas y pasa a estar mejor representado por las propiedades dinámicas, que a su vez son superiores a las estáticas.

Por último, se comenta que durante los ensayos no se observó un modo de ruptura característico del hormigón bajo compresión cíclica. Sin embargo, como ocurre en los ensayos de compresión estática, la ruptura del material se configuró de forma más abrupta en los hormigones con mayor resistencia a la compresión. Además, cabe destacar que el modo abrupto observado en la ruptura del hormigón de alta resistencia fue mayor en los ensayos cíclicos que en los de compresión estática, lo que indica que el nivel de fragilidad del material es un parámetro influyente en el comportamiento mecánico del hormigón sometido a cargas cíclicas.

5. CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico del hormigón sometido a compresión cíclica fue investigado experimentalmente en este trabajo mediante la evaluación de la vida útil a la fatiga, considerando hormigones de tres clases de resistencia y sometidos a diferentes condiciones de carga. A la hora de evaluar los resultados obtenidos, se pueden indicar las siguientes consideraciones:

- La vida útil a la fatiga es más larga a medida en que se aumenta la frecuencia de carga aplicada, una condición válida desde que se mantenga el nivel máximo de tensión aplicado. Una justificación plausible de este comportamiento se debe a los mayores valores de las propiedades dinámicas del material, comparados con los valores de las propiedades físicas (Figura 6.b);

- El número de ciclos necesarios para llevar la muestra a la ruptura se reduce aumentando el nivel máximo de tensión aplicado. Este comportamiento se verificó y se asoció al aumento del nivel de daño del material, medido experimentalmente al evaluar la reducción del módulo de elasticidad tangente obtenido a partir del historial de cargas;
- Existe una relación inversa entre la resistencia a la compresión del hormigón y a la vida útil a la fatiga, y esta relación es más evidente cuando se evalúa el hormigón con una resistencia superior a 50 MPa (hormigón de alta resistencia);
- Al considerar la variabilidad del número de ciclos necesarios para generar la ruptura del material (Figuras 6-8), se observó que la dispersión de los datos en torno al promedio disminuye a medida que disminuye la frecuencia de carga, y este comportamiento es independiente del nivel de tensión máxima utilizado. Tal resultado puede indicar que el grado de fiabilidad de modelos de vida útil de componentes estructurales de hormigón sometidos a fatiga debe ser inferido en función de la frecuencia de carga a la que están sometidas las estructuras.

Finalmente, se menciona que este es el primer estudio experimental desarrollado por el grupo de investigación, y que en el futuro se realizarán nuevos experimentos para ampliar el análisis a otros niveles de tensión, frecuencia de carga y resistencia a la compresión del material. Como trabajo futuro, también se pretende proponer curvas S-N para el hormigón sometido a compresión cíclica, así como formulaciones que contribuyan en el análisis del proyecto a fatiga de elementos de concreto.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por el apoyo brindado a la investigación a los órganos brasileños: Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq) (CNPq 141078/2018, 310564/2018-2 y 428762/2018-2) y la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES código 001).

7. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 23: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro.
- Al-Gadhib, A. H., Baluch, M., Shaalan, A., Khan, A. (2000), *Damage model for monotonic and fatigue response of high strength concrete*. International Journal of Damage Mechanics, v. 9, n. 1, p. 57-78.

<https://doi.org/10.1177/105678950000900105>

Arora, S., Singh, S. P. (2016), *Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates*. Construction and Building Materials, v. 102, n. 1, p. 782-791.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.098>

ASTM International (2015), *ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*.

Baroni, H. J. M. (2010), “*Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados*”. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Chen, X., BU, J., Fan, X., Lu, J., Xu, L. (2017), *Effect of loading frequency and stress level on low cycle fatigue behavior of plain concrete in direct tension*. Construction and Building Materials, v. 133, p. 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.085>

Clemmer, H. F. (1922), *Fatigue of concrete*. Proceedings, American Society for Testing and Materials. v. 22, n. 2, p. 408-419.

Cornellissen, H. A. W. (1984), *Fatigue failure of concrete in tension*. Heron, v. 29, n. 4, p. 2-67.

Cornelissen, H. A. W., Leewis, M. (1986) “*Fatigue experiments for the design of plain concrete pavements*” in: Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, CROW-PIARC-CEMBUREAU, Report 1, Holanda.

Dowling, N. E. (2012), “*Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*”. Practice Hall, 4th edition, United States.

Graeff, E.; Prudêncio Jr., L. R. (2016). *Determinação do módulo de elasticidade dos concretos da central de Itajaí da Maxmohr*. [S.l.]: Relatório técnico.

Jansen A. (1996), “*Research to fatigue behaviour of topping on prefabricated concrete girders*”. Thesis (Master). Delft University of Technology. Holanda.

Jiang, C., Xianglin, G., Huang, Q., Zhang, W. (2017), *Deformation of concrete under high-cycle fatigue loads in uniaxial and eccentric compression*. Construction and Building Materials, v. 141, p. 379-392.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.023>

Junges, P. (2017), “*Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado a partir de dados de sistemas B-WIM*”. Tese (Doutorado). Centro Tecnológico: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

Kasu, S. R., Deb, S., Mitra, N., Muppireddy, A. R., Kusam, S. R. (2019), *Influence of aggregate size on flexural fatigue response of concrete*. Construction and Building Materials, v. 229, p. 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116922>

Kessler-Kramer, C., Mechtcherine, V., Mueller, H. S. (2003), “*Failure of normal and high strength concrete under monotonic and cyclic tensile loading*” in: Brittle Matrix Composites 7. Woodhead Publishing. p. 277-286. <https://doi.org/10.1533/9780857093103.277>

Kim, J. K., Kim, Y. Y. (1996), *Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete*. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 10, p. 1513-1523.

Kim, J., Yi, C., Lee, S. J., Zi, G. (2013), *Flexural fatigue behaviour of concrete under uniaxial and biaxial stress*. Magazine of Concrete Research, v. 65, n. 12, p. 757-764. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00151-2)

Lantsoght, E. O. L., Van Der Veen, C., Boer, A. (2016), *Proposal for the fatigue strength of concrete under cycles of compression*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 138-156.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.007>

Lee, M. K., Barr, B. I. G. (2004), *An overview of the fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites. v. 26, p. 299-305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)

Lü, P., Li, Q., Song, Y. (2004), *Damage constitutive of concrete under uniaxial alternate tension-compression fatigue loading based on double bounding surfaces*. International Journal of Solids and

- Structures, v. 41, p. 3151-3166. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.01.026>
- Mascarenhas, F. Jr. R., Carvalho, R. C. (2019), *Vida útil à fadiga da armadura longitudinal de vigas de pontes de concreto armado frente ao tráfego real de veículos pesados*. Revista ALCONPAT, v. 9, n. 3, p. 303-319. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.375>
- Medeiros, A. (2012), “*Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras*”. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Ortega, J. J., Ruiz, G., Yu, R. C., Afanador-García, N., Tarifa, M., Poveda, E., Zhang, X., Evangelista JR., F. (2018), *Number of tests and corresponding error in concrete fatigue*. International journal of fatigue, v. 116, p. 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.022>
- Popovics, J. S. (2008) “*A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete*”. University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Reports.
- Raithby, K. D., Galloway, J. W. (1974), “*Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete*” in: ABELES Symposium: Fatigue of Concrete. ACI Publication, v. 41, p. 15-34.
- Rodrigues, P. P. F. (1984), “*Parâmetros de dosagem do concreto*.” São Paulo: ABCP, 1984.
- Saini, B. S., Singh, S. P. (2020), *Flexural fatigue life analysis of self-compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, v. 253, p. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119176>
- Sparks, P. R. (1982), *Influence of rate of loading and material variability on the fatigue characteristics of concrete*. ACI Journal, v. 75, n. 16, p. 331-342.
- Subramaniam, K. V., Shah, S. P. (2003), *Biaxial tension fatigue response of concrete*. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 6, p. 617-623. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00075-6)
- Tepfers, R., Kutti, T. (1979), *Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete*. ACI Journal, v. 76, n. 29, p. 635-652.
- Vasconcellos, A. T. D. (2018). “*Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos*”. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.
- Xiao, J., Li, H., Yang, Z. (2013), *Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings*. Construction and Building Materials, v. 38, p. 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.024>
- Zhang, B., Phillips, D. V., Wu, K. (1996), Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 48, n. 177, p. 361-375. <https://doi.org/10.1680/mac.1996.48.177.361>
- Zhang, B., Phillips, D. V., Wu, K. (1997), *Further research on fatigue properties of plain concrete*. *Magazine of Concrete Research*, v. 49, n. 78, p. 241-252. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.180.241>

Activadores alternativos para cementos de activación alcalina

J. Payá^{1*} , J. Monzó¹ , M. V. Borrachero¹ , L. Soriano¹ , M. M. Tashima² 

*Autor de Contacto: jjpaya@cst.upv.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>

Recepción: 08/11/2021 | Aceptación: 07/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Los cementos de activación alcalina (CAA) requieren de un componente alcalino para la activación del precursor. La fabricación del activador alcalino (AA) supone un consumo energético y de materias primas muy importante, de modo que la huella de carbono de los CAA está fundamentalmente influenciada por ese factor. Una alternativa es el uso de otras materias para la preparación del AA. En este trabajo se realiza un exhaustivo análisis de las diferentes alternativas: materias de base silíceas para la preparación de silicatos alternativos y materias de base alcalina. Se comparan de forma relativa las huellas de carbono con respecto a cementos Portland comerciales, y se analiza el efecto que tiene la sustitución de reactivos comerciales por activadores alternativos.

Palabras clave: activación alcalina; activadores alternativos; cenizas de biomasa; residuos industriales; huella de carbono.

Citar como: Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M. (2022), “Activadores alternativos para cementos de activación alcalina”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 16 – 31, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>

¹ Grupo de Investigación en Química de los Materiales (GIQUIMA), Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

² Grupo de Pesquisa MAC– Materiais Alternativos de Construção, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Contribución de cada autor

En este trabajo la actividad de búsqueda bibliográfica fue llevada a cabo por M. Tashima (50%) y L. Soriano (50%); la actividad de extracción de información por J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) y M. Tashima (20%); la redacción del documento por J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) y M. Tashima (20%); la revisión del texto por J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) y M. Tashima (20%); el diseño de figuras y la adaptación al formato por J. Payá (100%); traducción al inglés M. Tashima (100%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Alternative activators in alkali activated cements

ABSTRACT

Alkali activated cements (AAC) require an alkaline component for activating of the precursor. The manufacture of the alkaline activator (AA) involves a very important energy and raw material consumption, so that the carbon footprint (CF) of AAC is basically influenced by this factor. An alternative is the use of other materials for AA preparation. In this work an exhaustive analysis of the different alternatives is carried out: silica-based materials to prepare of alternative silicates and alkaline-based materials. CF is compared relative to commercial Portland cements, and the effect of replacing commercial reagents with alternative activators is analyzed.

Keywords: alkali activation; alternative activators; biomass ash; industrial waste; carbon footprint.

Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos

RESUMO

Os Cimentos Ativados por Alcalinos (CAA) requerem um componente alcalino para a ativação do precursor. A fabricação do ativador alcalino (AA) envolve um consumo de energia e matéria-prima muito importante, de forma que a pegada de carbono dos CAA é fundamentalmente influenciada por este fator. Uma alternativa é o uso de outros materiais para a preparação de AA. Neste trabalho é realizada uma análise exaustiva das diferentes alternativas: materiais à base de sílica para a preparação de silicatos alternativos e materiais à base de alcalinos. As pegadas de carbono são comparadas com os cimentos Portland comerciais, comparando o efeito da substituição dos reagentes comerciais por ativadores alternativos.

Palavras-chave: ativação alcalina; ativadores alternativos; cinza de biomassa; resíduos industriais; pegada de carbono.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Listado de acrónimos (por orden de aparición en el texto)

Acrónimo	Significado
AA	Activador alcalino
CAA	Cemento de activación alcalino
MK	Metacaolín
CV	Ceniza volante de carbón
ESC	Escoria de alto horno
CER	Residuo cerámico
NS	Nanosílice
TD	Tierra de diatomeas
FCC	Catalizador gastado de craqueo catalítico
SS	Silicato sódico
TDR	Tierra de diatomeas residual
HS	Humo de sílice
RV	Residuo de vidrio
CCA	Ceniza de cáscara de arroz
CPCA	Ceniza de paja de caña de azúcar
CBCA	Ceniza de bagazo de caña de azúcar
CHB	Ceniza de hoja de bambú
LB	Licor Bayer
LR	Lodo rojo
LLA	Líquido limpiador alcalino
CHO	Ceniza de hueso de oliva
CCAL	Ceniza de cáscara de almendra
CMAC	Ceniza de madera con alto calcio
CMM	Ceniza de mazorca de maíz

1. INTRODUCCIÓN

El término “Economía Circular” se ha instaurado en la mayor parte de las propuestas sobre el desarrollo de la humanidad en los retos globales (cambio climático, biodiversidad, residuos y contaminación). Esta economía circular está enfocada a un modelo productivo+consumo en el que se prioriza la reducción, la reutilización, la reparación, el reciclado, la recuperación y la valorización de productos. De este modo, el ciclo de vida de los productos se debe extender en la mayor medida de lo posible, minimizando tanto el consumo de recursos naturales y de energía como la generación de residuos y contaminación del entorno.

La circularidad puede y debe extenderse a cada uno de las áreas de desarrollo, científicas, tecnológicas y humanas. Dado que muchos de los procesos de fabricación están relacionados con procesos y reacciones químicas, del mismo modo que los fenómenos de contaminación y de gestión de residuos, toma especial importancia el término “Química Circular” (Keijer et al., 2019; Mohan, y Katakjwala, 2021). La Química es la ciencia esencial para la Economía Circular, donde la estrategia se enfoca hacia la innovación química a nivel atómico, molecular y estructural.

En el ámbito de la construcción y, específicamente, el área del hormigón, el material más utilizado por la humanidad después del agua, debe desarrollarse bajo el paraguas de la Química Circular. El cemento, como material clave conglomerante en la preparación de hormigones, es un material sintético fabricado a partir de diversos componentes y que está constituido por un conjunto de compuestos químicos, que por reacción con el agua desarrollan otros productos químicos que son los responsables de las propiedades tecnológicas de los conglomerantes.

En la antigüedad ya se preparaban los conglomerantes aéreos basados en yeso y cal hidratada a través de la transformación de materias naturales, y dichos conglomerantes reaccionaban con agua y/o con dióxido de carbono para producir materiales resistentes y con estabilidad para ciertos entornos. La introducción por los ingenieros romanos de los materiales puzolánicos, fundamentalmente cenizas de origen volcánico, en las mezclas con cal hidratada, dio un giro químico transcendental (Pavía y Caro, 2008), que, muchos siglos más tarde, sería retomado para el desarrollo de nuevos cementos con adiciones puzolánicas.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, se implementaron procesos químicos para la fabricación de conglomerantes hidráulicos, que culminaron con la patente de Joseph Aspdin en 1824: se inició, por tanto, el período del cemento Portland desplazando el uso de materiales como la cal y el yeso. El cemento es el material que conforma desde ese momento hasta nuestros días una gran parte de edificaciones e infraestructuras (Hall, 1976). El desarrollo de procesos químicos a alta temperatura (clinkerización) permitieron la elaboración de cementos de elevadas prestaciones y aceptable durabilidad. El conocimiento de las reacciones químicas de hidratación del cemento Portland y la interacción de éstas con el resto de componentes del hormigón y del entorno (humedad, CO₂, cloruros, ...) ha permitido la evolución de las características de los nuevos cementos comerciales basados en el clínker del cemento Portland.

En las últimas décadas, la preocupación por la emisión de los gases de efecto invernadero que supone la fabricación del cemento Portland, el empeño por la reducción en el consumo de materias primas no renovables y los requerimientos en la mejora del desempeño tecnológico de los hormigones, ha llevado a la química de los materiales a nuevos caminos más sostenibles, complementarios y más circulares (Phair, 2006). Se ha investigado en profundidad sobre cementos con mayor proporción de adiciones puzolánicas e hidráulicas, cementos belíticos, cementos de sulfoaluminato de calcio, cementos de magnesia y cementos de activación alcalina.

El presente trabajo se centra en los cementos de activación alcalina (CAA), específicamente en los activadores alcalinos (AA) utilizados, su impacto en términos de huella de carbono y en las alternativas que supone una aplicación de la Química Circular. El trabajo está desglosado en una sección inicial sobre conceptos básicos de la química de los cementos de activación alcalina,

seguida de una evaluación comparativa de la huella de carbono asociada a los diferentes cementos de activación alcalina convencionales, con respecto a los cementos basados en clínker Portland, para finalizar con una descripción de los materiales alternativos, de origen residual, que pueden ser usados para la elaboración de los activadores alcalinos y la evaluación de la huella de carbono potencial.

2. NATURALEZA DE LOS CEMENTOS DE ACTIVACIÓN ALCALINA (CAA) Y ORIGEN DE LOS COMPONENTES

Básicamente, los cementos de activación alcalina (CAA) se forman por la combinación de dos componentes (“two part”): el mayoritario es el precursor, de base química $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ejemplos: metacaolín MK, ceniza volante de central termoeléctrica de carbón CV), aunque en algunos casos también puede contener cantidades significativas de CaO (escorias de alto horno, ESC). El otro componente, minoritario, es una disolución acuosa altamente alcalina (hidróxidos, silicatos, carbonatos de sodio o de potasio). La mezcla de estos dos componentes produce la formación de sustancias de carácter cementante del tipo silicoaluminato alcalino (Na,K) hidratado (N(K)-A-S-H) o, en el caso de presencia de calcio, silicoaluminato cálcico hidratado (C-A-S-H); también se pueden producir geles de naturaleza híbrida entre los dos anteriores, C(N,K)-A-S-H.

La gran ventaja de estos CAA, desde el punto de vista de la química circular y desde el punto de vista de la sostenibilidad, reside en que, para muchos casos, se pueden usar residuos procedentes de otras actividades antropogénicas de tipo industrial y agrícola. Este es el caso de ESC y de CV, así como residuos de construcción como los de tipo cerámico, CER. En otros casos, la circularidad no es posible puesto que el precursor se fabrica ex profeso, como el MK (calcinación de caolín a 800°C). En los CAA se evita la aplicación de temperaturas muy altas, como ocurre en la clinkerización del cemento Portland (1450°C). La gran desventaja de los CAA es que el activador es una sustancia de síntesis química: hidróxidos tales como NaOH y KOH, carbonatos Na_2CO_3 y K_2CO_3 , silicatos Na_2SiO_3 (vidrio soluble, waterglass) y K_2SiO_3 . La obtención de estas sustancias supone el empleo de recursos naturales, la necesidad de procesos químicos y, sobre todo, un cuantioso consumo de energía, lo que conlleva un impacto significativo y un alejamiento de la circularidad. En los últimos años ha habido un desarrollo importante de los CAA en los que los dos componentes están combinados en uno solo (tecnología “one part”), de modo que su aplicación sigue el mismo modelo que para los cementos tradicionales: adición de agua al cemento “one part”.

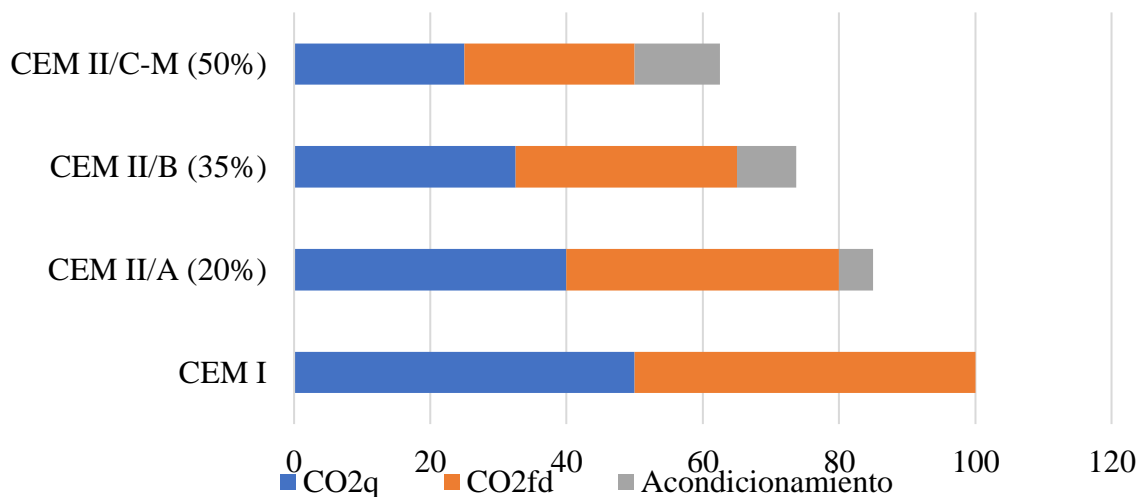
3. HUELLA DE CARBONO DE LOS CEMENTOS DE ACTIVACIÓN ALCALINA

Es bien conocido que la emisión de dióxido de carbono (CO_2) relacionada con la fabricación del clínker de cemento Portland, es decir, la huella de carbono, es muy elevada: el proceso supone una emisión de 850-1200 kg $\text{CO}_2/\text{t-clínker}$, todo ello dependiendo, fundamentalmente, de las tecnologías utilizadas y la efectividad en la recuperación del calor y el aislamiento de los elementos industriales. Se considera que la emisión de CO_2 tiene dos componentes: por una parte, la componente química, y, por otra, la componente energética.

La componente química es debida a la descarbonatación de la caliza. Para un clínker que contiene un 64% de CaO, la cantidad de CO_2 de la componente química (CO_2q) es de aproximadamente 500 kg $\text{CO}_2/\text{t-clínker}$. La cantidad de CO_2 de la componente de energía (CO_2fd), asociada al consumo de combustible y de energía eléctrica, es aproximadamente igual a la de CO_2q (Luukkonen et al., 2016). A nivel comparativo, podemos establecer un valor de 100 para la emisión de CO_2 asociada a un cemento con 95% de clínker (cemento de tipo CEM I en la nomenclatura europea), con una

contribución de 50 para CO_{2q} y 50 para CO_{2fd} (Ver Figura 1, CEM I). En el caso de cementos con adiciones minerales, se reduce de forma proporcional cada una de las contribuciones: en la Figura 1 se muestran los casos de CEM II/A (con 20% de adición) y CEM II/B (con 35% de adición). En la actualidad, a nivel europeo se está trabajando con la normalización del cemento CEM II/C-M (EN 197-5, 2021), en el que existe una mezcla de adiciones (M) hasta un 50%, ejemplo que también se muestra en la Figura 1. En el caso de los cementos con adiciones, debemos considerar que puede existir un consumo de energía en la preparación de las mismas (tamizado, molienda, secado), bien en procesos independientes o bien en procesos conjuntos de mezcla con el clínker sin moler. Es por ello que, en esos casos, existe una componente adicional que hemos denominado acondicionamiento.

Los activadores alcalinos sintéticos tienen asociados determinados valores de emisión de CO₂-equivalente (CO₂-e, kgCO₂/kg-reactivo); dichos valores dependen mucho del proceso industrial y de la tecnología usada en la síntesis (ver Tabla 1).



Clave: CO_{2q}: componente química; CO_{2fd}: componente energética; Acondicionamiento: tratamiento de las adiciones, previo o simultáneo con el clínker).

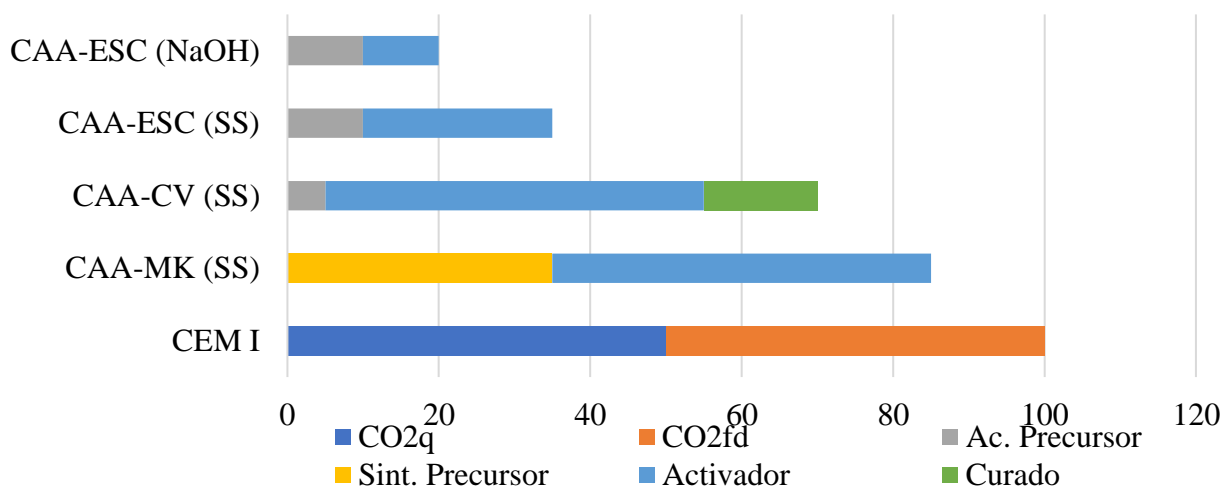
Figura 1. Comparativa de emisiones relativas de cementos basados en clínker de cemento Portland: CEM I, CEM II/A (con 20% de adición), CEM II/B (con 35% de adición) y CEM II/C-M (con 50% de adición). Escala relativa tomando 100 para el CEM I.

Tabla 1. Emisiones de CO₂ asociadas de algunos reactivos alcalinos (Tomado de: www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-)

Reactivo	CO ₂ -e kgCO ₂ /kg-reactivo
NaOH	1.12
KOH	1.94
Na ₂ CO ₃	0.59
K ₂ CO ₃	2.38
Na ₂ SiO ₃	1.64

Los CAA basados en metacaolín (MK) requieren de cantidades significativas de activador, sobre todo de silicato sódico SS (Weil et al., 2009). Asimismo, la fabricación de MK requiere de la calcinación a 800°C del caolín, por lo que la síntesis del precursor conlleva un importante consumo de energía. Un cálculo aproximado de las emisiones asociadas para un CAA basado en MK se muestra en la Figura 2: puede observarse que, comparando con CEM I, no existe una diferencia

significativamente ventajosa. Lógicamente, será tanto más ventajosa cuanto menor sea el consumo de silicato sódico en la dosificación. Los CAA basados en ceniza volante (CV) también requieren de cantidades muy importantes de activador, y para conseguir un buen desarrollo de la geopolimerización se necesita un curado a elevada temperatura, por lo que existe un consumo energético adicional a tener en cuenta en su aplicación (curado). En la Figura 2 se muestra que la emisión de CO₂ asociada es también muy elevada. En los dos casos anteriores, basados en MK y CV, el contenido en calcio de dichos precursores es bajo, lo que requiere de cantidades elevadas de activador. En el caso de precursores ricos en calcio, como en la escoria de alto horno ESC, se requiere de menores cantidades de activador. Además, se puede activar el precursor solamente con NaOH, sin la necesidad de usar silicato alcalino (SS o silicato de potasio). En la Figura 2 se muestra la gran ventaja existente para CAA-ESC con respecto a la huella de carbono relativa al compararla con los anteriores CAA comentados. La escoria requiere de la molienda previa (acondicionamiento precursor) para poder facilitar la reactividad en el medio alcalino.



Clave: CO₂q: componente química; CO₂fd: componente energética; Ac. precursor: Acondicionamiento (molienda); Sint. Precursor: proceso de síntesis del precursor (calcinación); Activador: asociado a la fabricación del activador; Curado: asociado al consumo de energía para el curado).

Figura 2. Comparativa de emisiones relativas de cementos CEM I con los CAA basados en metacaolín (MK), ceniza volante (CV) y escoria de alto horno (ESC). Activadores: hidróxido sódico (NaOH) y silicato sódico (SS). Escala relativa tomando 100 para el CEM I.

4. ACTIVADORES ALCALINOS ALTERNATIVOS

Como se ha podido comprobar en la sección anterior, la contribución del activador a la huella de carbono del CAA es muy relevante, por lo que las mejoras a este respecto deben centrarse en minimizar este componente. Una opción se focalizaría en la mejora de los procesos químicos de síntesis de los reactivos químicos, de modo que se reduzca el CO₂-e asociado. La otra opción, más adecuada para la economía y química circulares, es la valorización de residuos de carácter agrícola e industrial. En los últimos años, se ha venido produciendo una escalada en la publicación de artículos científicos en los que se valorizan residuos, con el objetivo de conseguir activadores eficientes que tengan una menor huella de carbono. En estas publicaciones se pueden encontrar propuestas variadas, y que se clasificarían en los siguientes conjuntos:

- a) Activadores alternativos basados en sílice: son activadores relacionados con los silicatos alcalinos, donde se hace reaccionar un hidróxido alcalino con una materia prima rica en sílice, la cual se disuelve total o parcialmente.

- b) Activadores alternativos basados en álcalis: en este caso, el propio material usado es ya propiamente una sustancia alcalina, de base sódica o potásica.
- c) Sistemas de activadores combinados sílice-álcali.

4.1. Activadores alternativos basados en sílice.

En este conjunto se encuentran distintas estrategias; por una parte, el uso de recursos naturales de base silíceas que puedan ser disueltos en diferentes condiciones; por otra parte, la disponibilidad de cenizas procedentes de la combustión de biomasa, cenizas con elevados porcentajes de SiO_2 ; y, finalmente, existe la opción de usar algunos residuos industriales ricos en sílice potencialmente reactiva.

4.1.1. Activadores de base silícea procedentes de recursos naturales.

En este apartado, encontramos referencias de dos recursos: la tierra de diatomeas y el olivino. La tierra de diatomeas (TD) es un material rico en sílice (generalmente $\text{SiO}_2 > 80\%$) formado por los esqueletos de diatomeas, algas unicelulares que se han depositado a lo largo de millones de años. Esta roca de origen sedimentario presenta sílice en estado amorfo, la cual puede ser disuelta en condiciones alcalinas. Font et al. (2018) presentaron un estudio en el que se hacía reaccionar TD con NaOH en un recipiente aislado térmicamente: la disolución de los pellets de NaOH en agua aumenta la temperatura del medio acuoso y eso favoreció la disolución de la sílice amorfa. Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento del activador preparado. Así, estos autores usaron este activador para el precursor FCC (catalizador usado de craqueo catalítico), obteniendo, en morteros, resistencias mecánicas de 30 MPa a los 7 días de curado a temperatura ambiente, sin necesidad de un curado a alta temperatura.

El olivino, $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$, es una materia natural que puede ser usada para la obtención de nanosílice, a partir de un proceso de disolución con ácido sulfúrico concentrado y posterior filtración (Gao et al., 2017). Estos autores usaron una disolución preparada con nanosílice (NS) y NaOH, y demostraron que la reactividad fue similar a la del silicato sódico comercial (waterglass, SS). Aplicaron este activador a una mezcla de escoria de alto horno (ESC) y de ceniza volante (CV), en una proporción 70/30, y la resistencia mecánica de los hormigones obtenidos se encontró en el intervalo 57-68 MPa a 7 días y 72-82 MPa a los 28 días, dependiendo del módulo de sílice (relación molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) utilizado en la activación.

4.1.2. Activadores de base silícea procedentes de residuos industriales.

En este apartado se describen ejemplos basados en tierra de diatomeas residuales, humo de sílice y residuos de vidrio.

La tierra de diatomeas se usa frecuentemente como componente de materiales filtrantes de líquidos, especialmente cerveza y vino. Al final del proceso de filtración se genera una tierra de diatomeas residual (TDR) que sigue presentando cantidades importantes de sílice amorfa potencialmente soluble. La TDR procedente del filtrado de cerveza (TDR-C) se usó para preparar activadores con NaOH (Mejía et al., 2016); este activador se combinó con un precursor formado por una mezcla de CV y MK (70/30) y la pasta se curó a 60°C durante 24 horas y, posteriormente, se curó a temperatura ambiente hasta los 360 días. Los valores de resistencia a compresión en el intervalo 7-360 días estuvieron cercanos a los 35 MPa. La TDR procedente del filtrado del vino (TDR-V) fue estudiada por Font et al. (2018); estos autores evaluaron el comportamiento del activador basado en este residuo y observaron que se producía una mejora sustancial si la TDR-V se calcinaba a 650°C para eliminar la materia orgánica procedente de la filtración: la resistencia mecánica a compresión, a los 28 días, de morteros de FCC activado era de unos 20 MPa, para el sistema sin la calcinación previa de la TDR-V, mientras que alcanzaba los 40 MPa para el sistema con la calcinación.

El humo de sílice (HS) es bien conocido por ser una puzolana excelente en los sistemas con cemento Portland, dada la elevada finura y el carácter amorfo de esa adición mineral de base silíceo. Este residuo, procedente de la industria del silicio y las aleaciones de ferrosilicio, puede ser usado como materia prima para la elaboración de activadores. Así, Rouseková et al. (1997) estudiaron la activación de ESC con una mezcla de HS y NaOH, obteniendo buenos resultados. Posteriormente, Bernal et al. (2012) estudiaron el activador HS/NaOH en sistemas MK+ESC; demostraron que la sílice proveniente del HS era incorporada a tiempos muy cortos en la reacción de geopolimerización, y se formaban mezclas de geles cementantes C-A-S-H, N-A-S-H, o incluso gel N-(C)-A-S-H.

En cuanto a los residuos de vidrio (RV), se pueden encontrar diversas composiciones químicas de los mismos, aunque lo más destacable es el estado amorfo y un elevado porcentaje de sílice. Desde 2014 se ha venido estudiando el potencial de RV para fabricar activadores. Los porcentajes de SiO₂ en RV están mayoritariamente en el intervalo 65-80%, y contenidos significativos de CaO y Na₂O (Liu et al., 2019). Se han realizado diversas aproximaciones para la preparación del activador alcalino, como se muestra en la Figura 3: método de fusión, métodos hidrotérmicos y método termoquímico. Se ha demostrado que la naturaleza y velocidad de formación de los hidratos cementantes depende, fundamentalmente, del tipo de precursor.

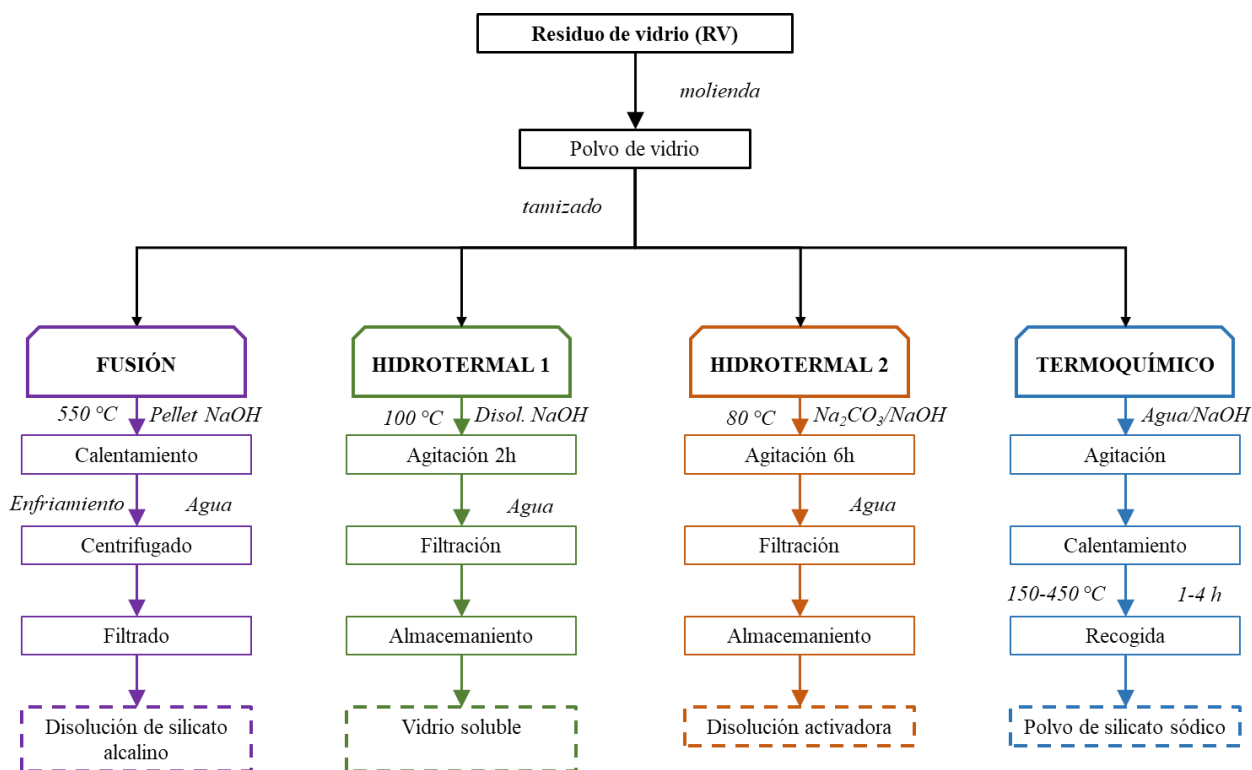


Figura 3. Métodos para la obtención de activadores alternativos a partir de residuo de vidrio (RV). (Adaptado de Lie et al, 2019).

4.1.3. Activadores de base silíceo procedentes de cenizas de biomasa.

En este apartado se encuentra el mayor número de ejemplos de activadores alternativos. La combustión de biomasa, en algunos casos, genera la formación de una cantidad relativamente importante (1-4% en masa) de cenizas. Los ejemplos más significativos son los de la cáscara de arroz, los residuos procedentes del cultivo y procesado de la caña de azúcar, y la hoja de bambú. El caso de la ceniza obtenida de la cáscara de arroz (CCA) es el más estudiado. Se ha publicado un número importante de ejemplos con el uso de CCA para la fabricación de silicato sódico. La

primera referencia bibliográfica se remonta a 2010 (Bejarano et al., 2010); los autores proponen un proceso hidrotérmico en el que analizan diferentes variables: la relación NaOH/CCA, el tiempo de tratamiento, la temperatura de reacción y la proporción agua/CCA. La conclusión sobre los parámetros óptimos eran NaOH/CCA=2, agua/CCA=10, 100°C de tratamiento por 120 minutos. Con estas proporciones, este grupo de investigación usó este tipo de activador en la activación alcalina de diversos precursores habituales (Mejía et al., 2016). Bouzón et al (2014) aplicaron un activador obtenido por reflujo de una mezcla de disolución de NaOH con CCA parcialmente amorfa, usando FCC como precursor en la preparación del mortero. Se obtuvieron sistemas con excelentes prestaciones mecánicas, si bien se observó que el activador era más reactivo si se usaba CCA molida en el proceso hidrotérmico (alrededor de 60 minutos, frente a los 120 minutos para la muestra no molida). Otros autores han profundizado en métodos y aplicaciones (entre otros: Tong et al., 2018; Rajan and Kathirvel, 2021). Villca et al. (2021) han utilizado un activador alternativo basado en CCA, fabricado sin consumo de energía; simplemente se ha usado el calor de disolución de los pellets de NaOH para disolver la sílice amorfa de CCA. Este activador fue aplicado, por primera vez, en sistemas binarios de cal/puzolana y geopolímero.

El cultivo de la caña de azúcar produce un residuo, la paja de la caña, que habitualmente es abandonada en el campo. El uso de esta biomasa podría repercutir en un beneficio, en cuanto a la valorización energética. El residuo generado, la ceniza de paja de caña de azúcar (CPCA) contiene cantidades elevadas de sílice (Moraes et al., 2018). En esta investigación, se demostró que el procedimiento que aprovecha el calor de disolución del NaOH para disolver la sílice es perfectamente viable para CPCA, y que el tratamiento no debe superar las 24 horas, porque se produce una gelificación del activador. La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) también se usó (Tchakouté et al., 2017) en la geopolimerización de MK; el conglomerante preparado alcanzó los 33 MPa a los 28 días de curado.

Finalmente, la ceniza de hoja de bambú (CHB), que posee un porcentaje de SiO₂ cercano al 80% (Roselló et al., 2015), se constituye como otra opción interesante. La CHB se usó a través de un proceso termoquímico con una temperatura de 300-330°C (Vinai et al., 2021). El activador se usó para el sistema CV/ESC (60/40) y se ha comprobado que, si bien, comparado con el activador SS+NaOH, la reactividad es menor en los primeros 7 días de curado, a los 28 días se alcanzan las mismas resistencias (alrededor de 43 MPa).

4.2. Activadores alternativos basados en álcalis.

La actividad humana también produce residuos de carácter alcalino, tanto de origen industrial como de origen agrícola.

4.2.1. Activadores de base alcalina procedentes de actividad industrial.

Entre ellos podemos encontrar algunos residuos relacionados con la actividad metalúrgica, tales como el licor Bayer, los líquidos limpiadores de metales y los lodos rojos.

El licor Bayer (LB) es una disolución cáustica preparada con NaOH y que se usa para la extracción del aluminio de la bauxita. La solución resultante, después del filtrado, es reutilizable, pero finalmente hay que descartarla cuando disminuye la eficiencia de la misma. Ese residuo, rico en aluminato sódico, se ha usado para la activación de la CV en diferentes condiciones (Jamieson et al. 2016).

El lodo rojo (LR) es el residuo sólido que se genera en la extracción del aluminio de la bauxita, y es muy rico en óxidos de hierro y sílice. Este lodo tiene un pH entre 9.7 y 12.8, y se ha usado para activar CV (Choo et al., 2016), aunque la resistencia alcanzada no superaba los 2 MPa.

El último ejemplo de esta categoría lo constituyen los líquidos limpiadores alcalinos (LLA), que se suelen producir como residuos en la limpieza de superficies de aluminio, de modo que son ricos en hidróxido y aluminato sódicos. Fernández-Jiménez et al. (2017) usaron LLA, con una

concentración en NaOH aproximadamente de 5M, para activar CV molida y polvo de RV. En ambos casos se pudo obtener resistencias mecánicas significativas, que rondaban los 10-16 MPa para CV y 2-10 MPa para RV (curados durante 20 horas y 85°C).

4.2.2. Activadores de base alcalina procedentes de residuos agrícolas.

Algunos residuos agrícolas son biomásas valorizables para la obtención de energía y sus cenizas resultantes tienen carácter alcalino. Ese carácter alcalino viene determinado por la presencia de calcio y, especialmente, de potasio. Este es el caso de la ceniza de hueso de oliva (CHO), de la ceniza de cáscara de almendra (CCAL) y de la ceniza de mazorca de maíz (CMM), así como de cenizas procedentes de madera con alto contenido en calcio (CMAC). La gran ventaja del uso de estas cenizas es que permiten la preparación de cementos “one part”, ya que son materiales sólidos. El primer estudio sobre el uso de CHO en CAA fue presentado por Font et al. (2017); se activó ESC con CHO y se comparó con la activación por medio del reactivo químico KOH. El resultado mostró que la resistencia mecánica a compresión para el sistema ESC/CHO fue superior (29.9 MPa frente a 16.9 MPa). Estudios posteriores (De Moraes Pinheiro et al., 2018) mostraron la formación de geles cementantes del tipo C(K)-S-H, C(K)-S-A-H, además de pequeñas cantidades de hidrotalcita. Posteriormente, Alonso et al. (2019) estudiaron cenizas procedentes de biomasa de olivo, tanto cenizas volantes como cenizas de parrilla: observaron que la alcalinidad de estas cenizas no era suficiente para activar CV, pero sí para activar ESC. Payá et al. (2019) emplearon el sistema ESC/CHO para la fabricación de bloques de tierra compactada de base dolomítica. Se obtuvo una resistencia a compresión de bloques compactados de unos 12 MPa a los 9 días con un curado bajo film de plástico (para evitar la evaporación de agua y mantener las condiciones óptimas de hidratación). Los bloques resultantes mostraron excelente resistencia bajo el agua.

Soriano et al. (2020) fueron los primeros en estudiar la potencialidad de ceniza de cáscara de almendra (CCAL). Encontraron que el porcentaje en K_2O para CCAL era mayor que para CHO (46.98% vs. 32.16%), y detectaron la presencia de varios minerales de carbonato de calcio y potasio ($K_2Ca(CO_3)_2$), tales como fairchildita y bütschilita, además de calcita ($CaCO_3$), portlandita ($Ca(OH)_2$) y arcanita (K_2SO_4). Esta ceniza ofreció un buen rendimiento cuando se combinaba con ESC.

Varios autores han investigado el uso de cenizas de madera con elevado contenido en calcio (CMAC); entre ellos destaca el realizado por Ban et al. (2014), en el que caracteriza la ceniza y la usa como activador sólido para la CV. La ceniza contenía una elevada proporción de CaO (61%) frente a una menor cantidad de K_2O (12%); las sales cálcicas encontradas fueron calcita, portlandita e hidroxiapatito.

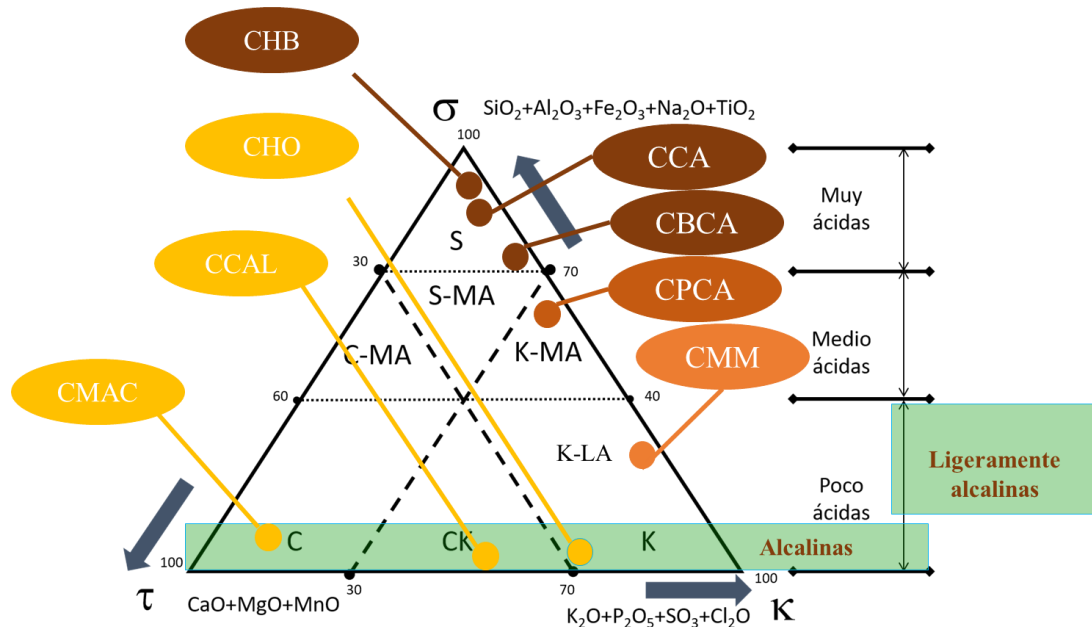
También se ha usado la ceniza de mazorca (raquis o coronta) de maíz (CMM) para la activación de MK (Peys et al., 2016): se alcanzó 30 MPa de resistencia a compresión para muestras con una relación CMM/MK de 1.2.

4.3. Sistemas combinados sílice-álcali.

Los CAA basados en el uso de cenizas alcalinas permite reducir el impacto, debido a que en algunos casos tanto el precursor como el activador proceden de residuos. Sin embargo, se observa que, frecuentemente, las prestaciones mecánicas no son muy elevadas por el déficit de sílice del activador. En este sentido, el desarrollo de activadores que contengan sílice y álcali permitiría minimizar este efecto. Font et al. (2020) diseñaron CAA con el sistema ternario ESC-CHO-CCA, en el que el activador se preparaba por reacción hidrotermal entre CCA y CHO, a 65°C durante 24 horas. Para una dosificación ESC-CHO-CCA de 9/4.5/1, se obtuvieron 35.0, 46.2 y 67.4 MPa, para morteros curados durante 7, 28 y 90 días, respectivamente, a 20°C.

4.4. Clasificación de las cenizas de biomasa en función de su reactividad.

El uso de cenizas procedentes de biomasa es una alternativa interesante para la síntesis de activadores sostenibles. En el diagrama ternario de la Figura 4 se muestra una versión ampliada del diagrama de Vassilev (Vassilev et al., 2010) sobre la clasificación de las cenizas de biomasa, en la que se han modificado las zonas de reactividad y se han representado diferentes tipos de cenizas. Se puede observar en la zona S (parte superior del diagrama) que existe un conjunto de cenizas potencialmente muy ácidas y que podrían suministrar un elevado porcentaje de silicatos a los activadores alternativos: se trata de la ceniza de cáscara de arroz (CCA), la ceniza de hoja de bambú (CHB) y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA). En una situación intermedia (Zona K-MA) se encuentra la ceniza de paja de caña de azúcar (CPCA), que contiene otros elementos en su composición y que reduce su contribución a la formación de silicatos. Finalmente, dentro de los materiales poco ácidos (Zona K-LA), se encuentra la ceniza de mazorca de maíz (CMM), que presenta un limitado aporte de silicio y una elevada proporción de potasio. En la zona más baja del diagrama, en donde se involucran los óxidos más alcalinos, básicamente CaO (extremo izquierdo) y K₂O (extremo derecho), se destacan tres zonas: la zona “C”, característica de cenizas con alto contenido en calcio, como es el caso de las cenizas de madera (CMAC); la zona “K”, con elevada proporción de óxido de potasio, como en la ceniza de cáscara de almendra (CCAL); y, finalmente, la zona intermedia “CK”, en la que se encuentra la ceniza de hueso de oliva (CHO).



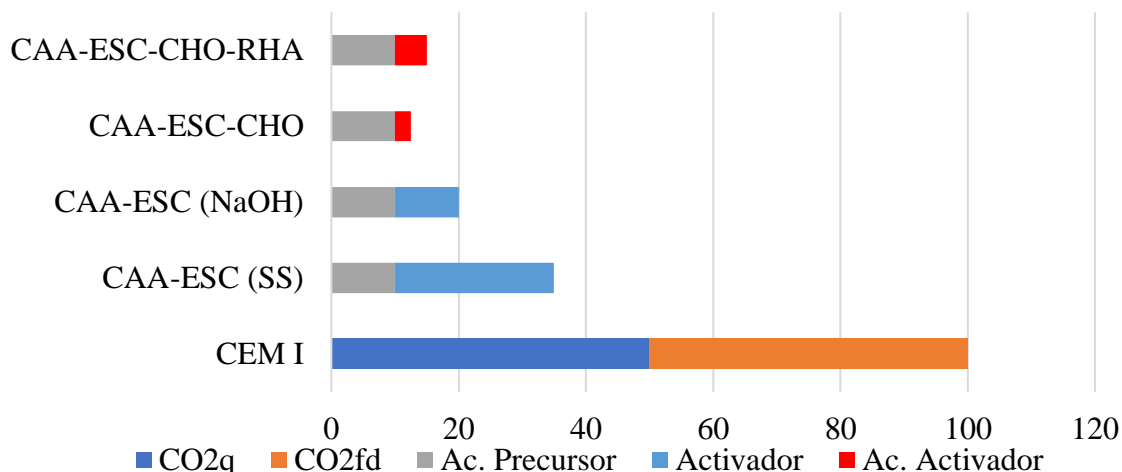
Clave: ceniza de hueso de oliva (CHO); ceniza de cáscara de almendra (CCAL); ceniza de madera de alto contenido en calcio (CMAC); ceniza de mazorca de maíz (CMM); ceniza de paja de caña de azúcar (CPCA); ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA); ceniza de cáscara de arroz (CCA); ceniza de hoja de bambú (CHB).

Figura 4. Diagrama de Vassilev modificado (adaptado de Vassilev et al., 2010).

5. HUELLA DE CARBONO DE CEMENTOS DE ACTIVACIÓN ALCALINA CON ACTIVADORES ALTERNATIVOS

La activación de la escoria con activadores sintéticos supone unas emisiones de CO₂ relativamente bajas (Figura 2). Sin embargo, se puede mejorar este aspecto cuando se trabaja con activadores alternativos. Como ejemplo, se analizará el sistema con ceniza de hueso de oliva (CHO). Además

de la valorización de residuos (en el caso de la biomasa, también valorización energética) se obtiene una ligera disminución del CO₂ asociado. En el caso del sistema ESC-CHO (Figura 5), lógicamente el acondicionamiento del precursor es el mismo, y solamente hay que tener en cuenta el acondicionamiento del activador (en este caso, la molienda). Las emisiones de CO₂ asociadas para el sistema ESC-CHO-RHA supone valores mayores, puesto que se debe acondicionar el activador por medio del tratamiento hidrotermal de la mezcla CHO-RHA. Pero este nuevo activador permite obtener mayores resistencias mecánicas, por lo que la emisión extra de CO₂ puede verse compensada por las prestaciones del material obtenido.



Clave: CO₂q: componente química; CO₂fd: componente energética; Ac. precursor: Acondicionamiento (molienda); Activador: asociado a la fabricación del activador
Ac. Activador: acondicionamiento de activador (hidrotermal).

Figura 5. Comparativa de emisiones relativas de cementos CEM I con los CAA producidos con activares alternativos sobre precursor de escoria de alto horno (ESC). Activadores comerciales: hidróxido sódico (NaOH) y silicato sódico (SS); Activadores alternativos, ceniza de hueso de oliva (CHO) y ceniza de cáscara de arroz (CCA). Escala relativa tomando 100 para el CEM I.

6. CONCLUSIONES

Es evidente que el desarrollo de los CAA supone disponer tanto de precursores adecuados como de activadores. Probablemente, no existe a día de hoy suficiente capacidad para disponer de precursores en cantidad y localización suficientes para la sustitución del cemento Portland de forma completa. Por ello, es difícil plantear que los CAA sean una solución excluyente, sino que su producción hay que enfocarla desde el punto de vista de la complementariedad con los cementos Portland y otros tipos de cementos (belíticos, de sulfoaluminato de calcio, de base magnesia). El hecho importante es que existen algunos entornos en donde se generan precursores potencialmente comercializables (cerámicos, residuos de construcción, diferentes tipos de escorias metalúrgicas), y deben aprovecharse todas las posibilidades. Lo mismo ocurre con los activadores alternativos: el uso de reactivos químicos de síntesis se puede sustituir en entornos en donde existan actividades agrícolas o industriales que puedan generar componentes adecuados para la preparación del activador. Esta circunstancia puede ser de especial interés en sociedades en vías de desarrollo en las que existe dificultad (básicamente económica) para adquirir cemento Portland, pero que disponen de recursos propios para la fabricación de CAA (residuos de construcción, biomasa, ...). Como conclusiones sobre los activadores alternativos, destacan las siguientes:

a) Los CAA no siempre suponen una reducción drástica de las emisiones de CO₂ asociadas: hay que considerar que en algunos casos las cantidades necesarias de reactivos químicos suponen una

huella de carbono comparable con los cementos Portland.

b) Los precursores como la ESC requieren de cantidades menores de activador, lo que tiene como consecuencia que las emisiones de CO₂ sean menores que para el caso de otros precursores como pueden ser la CV o el MK.

c) Los activadores alternativos pueden ser de origen agrícola o industrial, pero en cualquier caso requieren de una caracterización completa, que integre tanto los estudios de acondicionamiento previo necesario como los potenciales problemas de su uso (presencia de componentes químicos dañinos para algunas aplicaciones, como, por ejemplo, cloruros).

d) Los residuos de base silíceo no pueden ser usados de forma independiente, debido a su elevada acidez (sílice, fundamentalmente). Los residuos de base alcalina sí pueden ser usados de forma independiente. La combinación de ambos tipos de residuos puede mejorar el comportamiento mecánico de los CAA y puede potenciar sus usos.

e) El uso de residuos sólidos como activadores alternativos permite la elaboración de cementos “one part”. Adicionalmente, se puede realizar una molienda conjunta de precursor y activador lo que mejora la mezcla íntima de ambos componentes.

7. AGRADECIMIENTOS

Por la financiación, al Gobierno de España, Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto BIA2017-87573-C2-1-P) y a los fondos FEDER. M.M.T. agradece al Ministerio de Universidades del Gobierno de España y a la Universitat Politècnica de València por la ayuda “María Zambrano para la atracción de talento internacional” para la recualificación del sistema universitario español.

8. REFERENCIAS

- Alonso, M. M., Gascó, C., Morales, M. M., Suárez-Navarro, J. A., Zamorano, M., Puertas, F. (2019). *Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, durability, radiology and leaching behaviour*. Cem. Concr. Compos. 104, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103384>
- Ban, C. C., Nordin, N. S. A., Ken, P. W., Ramli, M., Hoe, K. W. (2014). *The high volume reuse of hybrid biomass ash as a primary binder in cementless mortar block*. Am. J. Appl. Sci. 11, 1369–1378. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.1369.1378>
- Bejarano, J., Garazón, C., Mejía de Gutiérrez, R., Delvasto, S., Gordillo, M. (2010). *In: II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción*, Valencia, Spain, November 8-9, 2010
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía De Gutiérrez, R., Provis, J. L., Delvasto, S. (2012). *Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash*. Waste Biomass Valor. 3, 99–108. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9093-3>
- Bouzón, N., Payá, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J. (2014). *Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders*. Mater. Lett. 115, 72-74. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>
- Choo, H., Lim, S., Lee, W., Lee, C. (2016). *Compressive strength of one-part alkali activated fly ash using red mud as alkali supplier*. Constr. Build. Mater. 125, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.015>
- De Moraes Pinheiro, S. M., Font, A., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2018). *Olive-stone biomass ash (OBA): An alternative alkaline source for the blast furnace slag activation*. Constr. Build. Mater. 178, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.157>

- Fernández-Jiménez, A., Cristelo, N., Miranda, T., Palomo, A. (2017). *Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes*. J. Clean. Prod. 162, 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151>
- Font, A., Soriano, L., Moraes, J. C. B., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2017). *A 100% waste-based alkali-activated material by using olive-stone biomass ash (OBA) and blast furnace slag (BFS)*. Mater. Lett. 203, 46–49. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.05.129>
- Font, A., Soriano, L., Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Payá, J. (2018). *Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production*. Mater. Lett. 223, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.04.010>
- Font, A., Soriano, L., de Moraes Pinheiro, S. M., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2020). *Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash*. J. Clean. Prod. 243, 118568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118568>
- EN 197-5, 2021. *Cement - Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI*.
- Gao, X., Yu, Q. L., Lazaro, A., Brouwers, H. J. H. (2017). *Investigation on a green olivine nano-silica source based activator in alkali activated slag-fly ash blends: Reaction kinetics, gel structure and carbon footprint*. Cem. Concr. Res. 100, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.06.007>
- Hall, C. (1976). *On the history of portland cement after 150 years*. Journal of Chemical Education, 53(4), 222.
- Jamieson, E., van Riessen, A., McLellan, B., Penna, B., Kealley, C., Nikraz, H. (2017). *Introducing Bayer liquor-derived geopolymers*. In: *Handbook of low carbon concrete*. Nazari, A. and Sanjayan, J.G. (eds), Kidlington, Oxford, United States: Elsevier.159-193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00008-7>
- Keijer, T., Bakker, V., Slootweg, J. C. (2019). *Circular chemistry to enable a circular economy*. Nature Chem 11, 190–195. <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0226-9>
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N. (2019). *An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials*. Resour. Conserv. Recycl. 144, 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). *One-part alkali-activated materials: A review*. Cem. Concr. Res. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Mejía, J. M., Mejía De Gutiérrez, R., Montes, C. (2016). *Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder*. J. Clean. Prod. 118, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.057>
- Mohan, S. V., Katakojwala, R. (2021). *The circular chemistry conceptual framework: A way forward to sustainability in industry 4.0*, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 28, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100434>
- Moraes, J. C. B., Font, A., Soriano, L., Akasaki, J. L., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2018). *New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator*. Constr. Build. Mater. 171, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.230>
- Pavía, S., Caro, S. (2008). *An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material*. Cons. Build. Mat. 22, 1807–1811. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.003>
- Payá, J., Monzó, J., Roselló, J., Borrachero, M. V., Font, A., Soriano, L. (2020). *Sustainable soil-compacted blocks containing blast furnace slag (BFS) activated with olive stone biomass ash (OBA)*. Sustain. 12, 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12239824>

- Peys, A., Rahier, H., Pontikes, Y. (2016). *Potassium-rich biomass ashes as activators in metakaolin-based inorganic polymers*. Appl. Clay Sci. 119, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.003>
- Phair, J. W. (2006). *Green chemistry for sustainable cement production and use*. Green chemistry, 8(9), 763–780.
- Rajan, H. S., Kathirvel, P. (2021). *Sustainable development of geopolymer binder using sodium silicate synthesized from agricultural waste*. J. Clean. Prod. 286, 124959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124959>
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J. L., José Luiz P. Melges, J. L. P., Payá, J. (2015). *Microscopy characterization of silica-rich agrowastes to be used in cement binders: bamboo and sugarcane leaves*. Microsc. Microanal. 21, 1314–1326. <https://doi.org/10.1017/S1431927615015019>
- Rouseková, I., Bajza, A., Živica, V. (1997). *Silica fume-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator*. Cem. Concr. Res. 27, 1825–1828. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00191-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00191-9)
- Soriano, L., Font, A., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2020). *One-part blast furnace slag mortars activated with almond-shell biomass ash: A new 100% waste-based material*. Mater. Lett. 272, 127882. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127882>
- Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H., Hinsch, M., Djobo, J. N. Y., Kamseu, E., Leonelli, C. (2017). *Utilization of sodium waterglass from sugar cane bagasse ash as a new alternative hardener for producing metakaolin-based geopolymer cement*. Chemie der Erde 77, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.003>
- Tong, K. T., Vinai, R., Soutsos, M. N. (2018). *Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders*. J. Clean. Prod. 201, 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 89, 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Villca, A.R., Soriano, L., Font, A., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2021). *Lime/pozzolan/geopolymer systems: Performance in pastes and mortars*. Cons. Build. Mat. 276 122208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122208>
- Vinai, R., Ntimugura, F., Cutbill, W., Evans, R. (2021). *Production of sodium silicate from bamboo leaf ash for alkali activation of binders*. Open Research Exeter. <https://ore.exeter.ac.uk/repository/bitstream/handle/10871/125925/Vinai%20et%20al.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Weil, M., Dombrowski, K., Buchwald, A. (2009). *Life-Cycle analysis of geopolymers*. In: Provis and van Deventer (ed), Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>

Análisis de la autorregeneración de matrices cementicias mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas

F. Pacheco^{1*} , A. Loeff² , V. Müller³ , H. Z. Ehrenbring¹ , R. Christ⁴ ,
R. C. E. Modolo³ , M. F. Oliveira⁵ , B. F. Tutikian³ 

*Autor de Contacto: fernandapache@unisinós.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

Recepción: 28/10/2021 | Aceptación: 07/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Este estudio analizó el potencial de cicatrización del concreto al utilizar soluciones químicas y bacterianas, evaluando diferentes materiales que se pueden utilizar para su encapsulación. Para encapsular los agentes se utilizaron arcilla y perlita expandidas. Para analizar la efectividad de la cicatrización, se realizaron técnicas de análisis visual utilizando un microscopio óptico de alta precisión y microtomografía 3D. Los resultados apuntaron a un mejor desempeño de la mezcla BAC.AE (soluciones bacterianas encapsuladas en arcilla expandida), utilizando solución bacteriana encapsulada en arcilla expandida, que fue capaz de cicatrizar grietas de hasta 0.57mm. Las mezclas BAC.PE (solución bacteriana encapsulada in perlita expandida), solución bacteriana encapsulada en perlita expandida, y SS (silicato de sodio), solución química agregada en el momento de la mezcla para reemplazar el agua, cicatrizaron grietas de 0.16 mm y 0.29 mm respectivamente.

Palabras clave: bioconcreto; autorregeneración; autocicatrización; fisuras; bacterias.

Citar como: Pacheco, F., Loeff, A., Müller, V., Ehrenbring, H. Z., Christ, R., Modolo, R. C. E., Oliveira, M. F., Tutikian, B. F. (2022), "Análisis de la autorregeneración de matrices cementicias mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 32 – 46, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

¹ Itt Performance, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

² Civil Engineering Undergraduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

³ Civil Engineering Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

⁴ Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Barranquilla Colombia

⁵ Architecture Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Pacheco ofreció la idea original. Muller y Loeff fueron los responsables del experimento. Ehrenbring y Christ realizaron las pruebas y análisis. Modolo, Tutikian y Oliveira trabajaron en la interpretación de los resultados y como revisores.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Evaluation of concrete self-healing with different insertion techniques of chemical and bacterial solutions

ABSTRACT

This study evaluated the self-healing potential of concrete with chemical and bacterial solutions encapsulated in different materials. The encapsulating materials were expanded clay (EC) and expanded perlite (EP). Self-healing effectiveness was evaluated visually with a high-precision optical microscope and 3D microtomography. Results pointed to improved performance of bacterial solutions encapsulated in expanded clay (BAC.EC) which were able to heal fissures of 0.57 mm. In contrast, bacterial solutions encapsulated in expanded perlite (BAC.EP) and sodium silicate replacing water during molding (SS) healed fissures of 0.16 mm and 0.29 mm, respectively.

Keywords: bioconcrete; self-healing; self-repairing; fissure; bacteria.

Análise da autorregeneração de matrizes cimentícias através de diferentes métodos de inserção de soluções químicas e bacterianas

RESUMO

Este estudo analisou o potencial de cicatrização do concreto quando do uso de soluções bacterianas e soluções químicas, avaliando diferentes materiais que podem ser empregados para seu encapsulamento. Para encapsular os agentes, foram empregadas argila expandida e perlita expandida. Para analisar a eficácia da cicatrização, realizaram-se as técnicas de análise visual através de microscópio óptico de alta precisão e microtomografia 3D. Os resultados apontaram para um melhor desempenho do traço BAC.AE (soluções bacterianas encapsuladas em argila expandida), utilizando solução bacteriana encapsulada em argila expandida, que foi capaz de cicatrizar fissuras de até 0,57mm, tendo os traços BAC.PE (soluções bacterianas encapsuladas em perlita expandida) e SS (silicato de sódio) inserido na moldagem, em substituição à água, cicatrizado fissuras de 0,16 mm e 0,29 mm respectivamente.

Palavras-chave: bioconcreto; autorregeneração; autocicatrização; fissuras; bactérias.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCION

El concreto tiene numerosas ventajas que conducen a su alta aplicabilidad (SEIFAN et al, 2016), sin embargo, el material sufre deterioro. Se observa que la sostenibilidad de las estructuras no se puede lograr si necesitan reparaciones y ajustes constantes. Por tanto, es fundamental que haya una mejora en la durabilidad del concreto, especialmente en los países del tercer mundo, donde las fallas más dañinas en la industria de la construcción son comunes (Chemrouck, 2015).

La durabilidad del concretos se puede describir como su capacidad para resistir el deterioro, y esta degradación proviene de la exposición a la intemperie o abrasión superficial (Achal et al, 2011), considerando que existen diferentes condiciones de exposición ambiental (Gjorv, 2016). Actualmente, los mayores responsables de la degradación del concreto son las fisuras, por varias causas. Para minimizar tales datos, se tiende a estudiar SHC - Concreto Autorregenerable (Azarsa et al, 2019), o concretos autorregenerativo, objeto de estudio en este trabajo.

La idea principal del hormigón autorreparable es que se deben dar las condiciones necesarias para que los agentes presentes en la matriz de cemento puedan rellenar las fisuras una vez que se han producido. En las últimas décadas, la investigación en esta área ha apuntado a muchas estrategias innovadoras (Wu et al., 2012), incluido el uso de agentes cicatrizantes en fibras huecas, su microencapsulación (White et al, 2001), la inserción de agentes expansores y aditivos minerales (Kishi; Ahn, 2010), materiales con memoria de forma (Abdulridha et al., 2012) y soluciones bacterianas (Krishnapriya et al, 2015).

Se ha demostrado que la adición de soluciones bacterianas a matrices cementosas es una posibilidad prometedor y sostenible (Krishnapriya et al, 2015; Wang et al, 2017; Rais y Khan, 2021). Esta técnica de autocuración se realiza agregando cápsulas de algún material específico que contiene la bacteria, que puede permanecer inactiva durante décadas, junto con un nutriente como el lactato de calcio (Jiang et al, 2020). Así, cuando las cápsulas se rompen con el agrietamiento del hormigón y hay humedad, las bacterias se activan y producen calcita (Patel, 2015). Las bacterias utilizadas deben ser capaces de soportar la alta alcalinidad del cemento y la presión de compresión interna de la matriz de cemento donde se inserta. También se debe proporcionar una fuente de nutrientes para que las bacterias se alimenten (Li; Herbert, 2012; Stanaszek-Tomal, 2020).

Además de la solución bacteriana, la solución química también ha demostrado ser una alternativa eficaz para cerrar grietas en la matriz de hormigón (Alghamri et al, 2016). En los estudios realizados por Huang et al. (2011) y Pelletier et al. (2011) se utilizaron cápsulas esféricas para encapsular una solución de silicato de sodio, que al romperse libera la solución a la matriz, donde ocurre la reacción con el hidróxido de calcio, formando silicato de calcio hidratado (C-S-H) que cura la fisura en el concreto.

Dados los actuales y complicados procesos de encapsulación en desarrollo, es notable la improbabilidad de sus aplicaciones a gran escala. Existe una escasez de estudios que comparen diferentes métodos de encapsulación para soluciones bacterianas y químicas insertadas en la matriz de cemento, por lo que este estudio realiza un análisis comparativo, con encapsulación de bacterias en perlita y arcilla expandida, y también la efectividad del uso de silicato de sodio. directamente en el agua de amasado.

2. AGRIETAMIENTO Y AUTOCICATRIZACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Las grietas se consideran las manifestaciones patológicas características de las estructuras de concreto y llaman la atención sobre el hecho de que está sucediendo algo anormal (Bianchini, 2008). Ferrara et al (2018) mencionan que minimizar la aparición de grietas sigue siendo un desafío para el concreto. Lottermann (2013) explica que algunas de las causas más comunes de

agrietamiento de estructuras son: curado deficiente; retracción; variación de temperatura; agresividad ambiental; cargando; errores de ejecución y detalle de proyectos y represiones de los apoyos. Las fisuras se pueden dividir en aquellas que se originan en estado fresco y aquellas que aparecen en el concreto una vez endurecido. También pueden estar motivados por más de una causa simultáneamente (Gupta; Pang; Kua, 2017). Considerando el efecto que tienen las fisuras en la durabilidad, sus aberturas límite están contempladas en normas nacionales e internacionales (Carmona Filho; Carmona, 2013). En la norma brasileña, por ejemplo, las fisuras permitidas están en el rango de valores entre 0,2 y 0,4 mm (ABNT, 2014).

Por mucho que se hayan realizado estudios previos sobre este tema, el hito inicial más aceptado en la literatura, que cambió la postura sobre el tema, fue la investigación de Dry, en 1994. Los estudios realizados por Dry (1994 apud Bianchin, 2018) propuso el uso de polímeros encapsulados para obtener hormigones autorreparables. Además, se propuso no solo la descripción de los fenómenos involucrados y sus posibles causas, sino también el uso intencional de estas propiedades con el fin de obtener un material más duradero.

Desde 2005 se han creado dos comités técnicos para estudiar los fenómenos de autocuración en materiales cementicios (Cappelleso, 2018). Parece haber consenso en el campo técnico en que los concretos autorreparables son aquellos con cierre de fisuras y los hormigones autoregeneradores, como los que implican la recuperación de propiedades mecánicas (Pacheco, 2020). También existe una diferenciación relacionada con los mecanismos utilizados para ello, divididos entre autógenos y autónomos. Autógeno se refiere a cuando el proceso utiliza materiales que podrían estar presentes en la composición del concreto y que no se utilizan específicamente para la autocuración. El procedimiento autónomo, en cambio, considera el uso de materiales que no se encontrarían en la composición y solo fueron agregados para este propósito. Los mecanismos autógenos no fueron estudiados en esta investigación, siendo muestras con puzolanas o cemento.

La cicatrización por mecanismos autónomos se basa en microcápsulas llenas de agentes cicatrizantes o tubos vasculares (Van Tittelboom et al., 2011; Wan et al, 2021). Entre los agentes cicatrizantes se encuentran soluciones químicas, soluciones bacterianas, polímeros superabsorbentes (PSA), aditivos reductores de la permeabilidad, expansores, entre otros. Como encapsulamiento se pueden utilizar materiales porosos, agregados ligeros, entre otros. Mila et al (2019) afirman que la disposición del material en cápsulas favorece la presencia de productos cicatrizantes a lo largo de la matriz.

La encapsulación de soluciones químicas corresponde a la impregnación de agregados ligeros y porosos con alguna solución química (Alghamri; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016). Souradeep y Kua (2016) explican que los agentes se liberan por ruptura de las cápsulas. Después de su liberación, los agentes cicatrizantes penetran en la fisura a través de la acción capilar. Souradeep y Kua (2016) afirman que la estrategia de encapsulación es capaz de incrementar la vida útil de los agentes de curado químicos o biológicos, asegurando la recuperación y mayor durabilidad del concreto. En términos de soluciones químicas, se señala como una posibilidad el uso de silicato de sodio (Manoj-Prabakar et al., 2017).

La aplicación de bacterias para la remediación de grietas consiste en la producción de calcita (CaCO_3) (Xu et al, 2020) que es ambientalmente inocuo en comparación con los polímeros sintéticos que se utilizan actualmente para la reparación del concreto. Sobre ellos, existen algunos enfoques diferentes en uso, y se puede utilizar la precipitación de carbonato de calcio a través de la hidrólisis bacteriana de la urea (Elzébio; Alves; Fernandes, 2017), así como la incorporación de esporas bacterianas y compuestos orgánicos en el concreto (Schwantes-Cezario et al., 2017).

Un factor que puede afectar a las bacterias es el pH muy alcalino del hormigón. Otro aspecto es que las células bacterianas pueden destruirse durante el proceso de hidratación del cemento. Por tanto, la encapsulación es una estrategia de protección para estos seres (Jonkers; Thijssen, 2010).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La tabla 1 muestra la composición de las mezclas realizados en esta investigación. La mezcla de referencia se basa en el estudio de Schwantes-Cezario et al. (2019).

Tabla 1. Variables de estudio.

Mezcla	Cemento	Arena	Perlita	a/c	Agente cicatrizante
Referencia	1,00	1,00	-	0,36	-
BAC.PE	1,00	0,7	0,064	0,36	<i>B.subtilis</i>
BAC.AE	1,00	0,7	0,147	0,36	<i>B.subtilis</i>
SS	1,00	1,00	-	0,18	Silicato de sodio

En las mezclas BAC.AE y BAC.PE, el 30% de la masa de arena fue reemplazada por el volumen correspondiente de arcilla expandida (AE) y perlita expandida (PE), respectivamente. En la mezcla SS se utilizó un aditivo superplastificante a base de policarboxilatos para ajustar la fluidez, con un contenido de 0.89% en relación con la masa de cemento. En cada una de las mezclas se realizaron ensayos de compresión, tracción en flexión (para inducción de fisuras), análisis visual y microtomografía 3D, con el objetivo de identificar los vacíos.

3.1 Materiales

El cemento utilizado en el estudio fue el cemento Portland tipo CP II-F-40, con uso de filler y sin adiciones puzolánicas. La arena utilizada en este estudio fue arena de cuarzo extraída de los ríos. La masa unitaria obtenida de la arena fue de 1,592.16 kg/m³ y la masa específica de 2,427.36 kg/m³. La granulometría de arena, que se muestra en la Figura 1, se obtuvo mediante ensayos según NBR NM 248 (ABNT, 2003). Como solución química se utilizó silicato de sodio neutro, en estado líquido, compuesto de fórmula Na₂SiO₃, por su alta compatibilidad con matrices cementicias, las cuales se diluyen al 50% en agua desionizada, razón por la cual la relación agua / cemento de esta mezcla es la mitad de las anteriores.

La especie bacteriana utilizada en la solución bacteriana en el programa experimental es *Bacillus subtilis* AP 91, de la unidad Campinas de EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Los procedimientos de verificación de la curva de crecimiento y preparación están incluidos en el estudio de Pacheco (2020). Se utilizó como diluyente una solución tampón estéril que contenía 1.06 g/L de fosfato de sodio (dibásico anhidro), 0.36 g/L de fosfato de sodio (monobásico) y 8.17 g/L de cloruro de sodio en agua desionizada fue utilizado como diluyente de la bacteria para la encapsulación y posterior inserción en la mezcla cementicia.

El PE fue suministrado por la empresa Pervale Minerais, con un tamaño de partícula entre 2 y 4 mm, habiendo sido tamizado antes de su uso para adaptarse a este rango de tamaño de partícula. La determinación de la masa unitaria se realizó para el material en su estado natural y para el material impregnado con la solución bacteriana y revestido con cemento, obteniendo valores de 128.43 kg/m³ y 328.52 kg/m³, respectivamente. La determinación de la granulometría de perlita (mostrada en la Figura 2) se realizó según NBR NM 248 (ABNT, 2003).

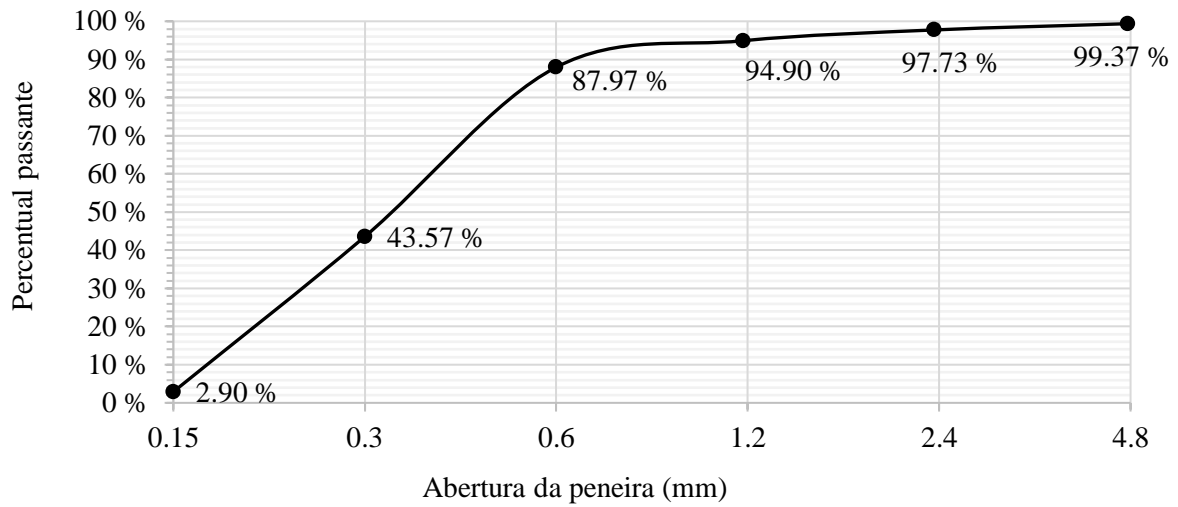


Figura 1. Distribución granulométrica de arena.

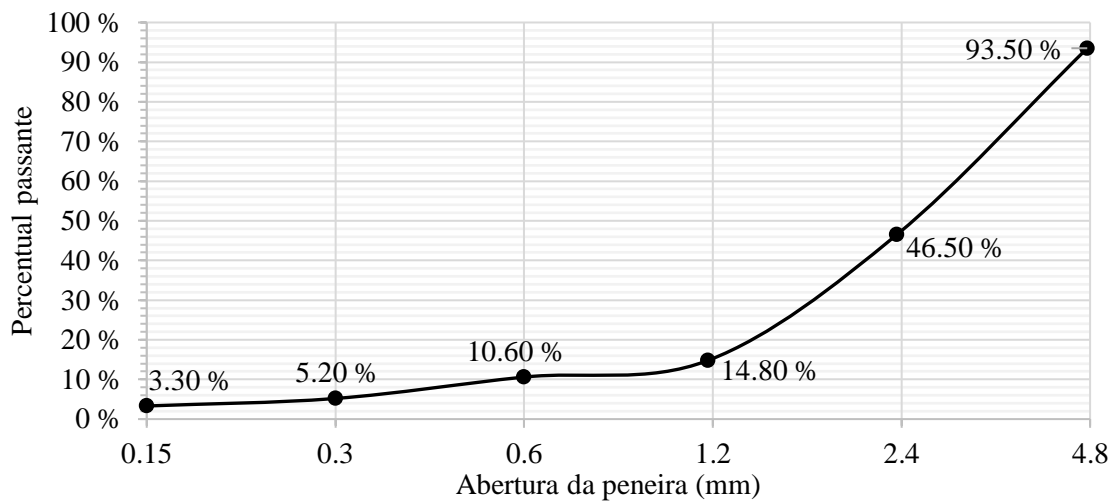


Figura 2. Distribución granulométrica de perlita expandida.

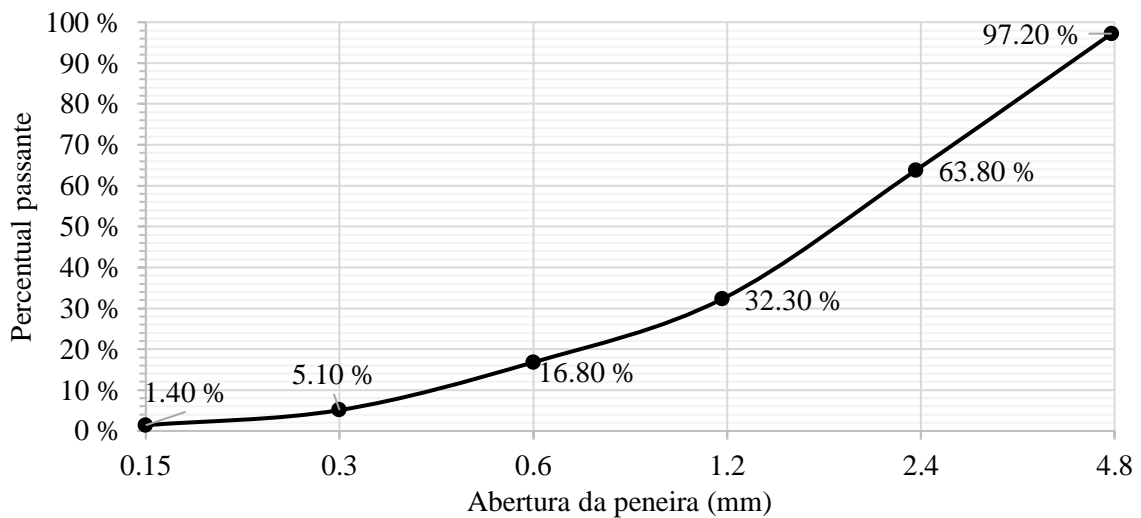


Figura 3. Distribución granulométrica de arcilla expandida.

El AE utilizado fue el tipo 0500, adquirido a la empresa Global Minérios, con una granulometría entre 2 y 4 mm. Para su caracterización se realizaron las pruebas de determinación de masa unitaria y granulométrica (ver Figura 3), de acuerdo con las normas NBR NM 45 (ABNT, 2006) y NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. La determinación de la masa unitaria se realizó en condiciones naturales y para el material impregnado con la solución bacteriana y revestido con cemento, con valores de 930.39 kg/m³ y 1395.48 kg/m³, respectivamente. La composición química de la perlita y la arcilla expandidas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química de los agregados ligeros utilizados para la encapsulación.

Elemento	AE		PE	
	Masa %	Atómica %	Masa %	Atómica %
O	42.80	58.92	43.05	57.65
Na	0.43	0.41	2.27	2.12
Mg	1.78	1.61	0.00	0.00
Al	10.23	8.35	7.18	5.70
Si	30.87	24.22	40.70	31.04
K	4.48	2.52	4.76	2.61
Ca	1.16	0.64	0.62	0.33
Ti	1.15	0.53	0.00	0.00
Fe	7.10	2.80	1.41	0.54
Total	100.00		100.00	

3.2 Métodos

Para los análisis realizados se moldearon un total de 27 probetas cilíndricas (50 x 100 mm) y 9 probetas prismáticas (60 x 60 x 180 mm), según NBR 5738 (ABNT, 2015), respectivamente, y 3 probetas de prueba cilíndrica (8 x 30 mm). Las muestras de forma prismática se reforzaron con una barra de acero CA 60 de 5 mm de diámetro, colocada a 2 cm de la base, para que la muestra no sufriera una rotura frágil. Luego de la deformación, las muestras fueron curadas en cámara con humedad y temperatura controlada, según NBR 5738, hasta la edad de prueba, en 7, 14 y 35 días (ABNT, 2015).

3.2.1 Encapsulación de solución bacteriana

El procedimiento con la solución bacteriana implicó la inmersión de las cápsulas en la solución y su saturación en un desecador de vacío, como lo realizaron Alghamri et al (2016) y Sisomphon; Copuroglu y Fraaij, (2011). Una vez completada la impregnación, PE y AE se enviaron a un horno durante 48 horas a 45 °C, según lo realizado por Zhang et al. (2017). Junto con la solución bacteriana, se eliminó el nutriente de lactato de calcio. Para proporcionar una envoltura protectora, se colocaron capas de cemento alrededor de los agregados, con el objetivo de la formación de una costra protectora. En relación con el encapsulado, se verificó inicialmente la masa de los agregados y posteriormente el encapsulado. Más detalles de este procedimiento experimental se pueden ver en el estudio de Pacheco (2020).

3.2.2 Ensayos

La resistencia a la compresión del concreto se obtuvo mediante NBR 5739 (ABNT, 2018). Para la formación de grietas, las muestras prismáticas se sometieron al ensayo de tracción por flexión de tres puntos, según NBR 13279 (ABNT, 2005). El análisis visual de la cicatrización se produjo al inicio del estudio y a los 7, 14 y 35 días. Se realizó una prueba de microtomografía 3D para verificar la distribución de huecos en el material. Para esta prueba se utilizaron muestras de forma cilíndrica

de 8x30 mm y se analizó una muestra por línea.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la resistencia a la compresión, el análisis visual y la microtomografía 3D se presentan en los siguientes elementos.

4.1 Resistencia mecánica a la compresión

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión se muestran en la Figura 4. Se puede observar que la resistencia a la compresión se mantuvo muy similar a lo largo del tiempo, lo que puede deberse al cemento utilizado, que ya presenta alta resistencia en las edades tempranas. La mayor diferencia encontrada está en la mezcla SS, con una diferencia de 4.7 MPa (11,63%) de resistencia, entre 14 y 35 días. La SS puede haber generado en este período C-S-H debido a su activación, ya que no depende de las grietas para actuar (GIANNAROS et al, 2016)

También es importante señalar que hubo una diferencia significativa de fuerza al comparar las diferentes mezclas, observándose que la mezcla BAC.AE adquirió una fuerza mucho mayor que las otras dos mezclas utilizadas, con una diferencia de hasta 12.7 MPa a 35 días. Es posible que ocurra esta diferencia, ya que la unidad de masa de la perlita es menor que la de la arcilla, y ambas se agregaron a las mezclas en tamaños de partícula similares.

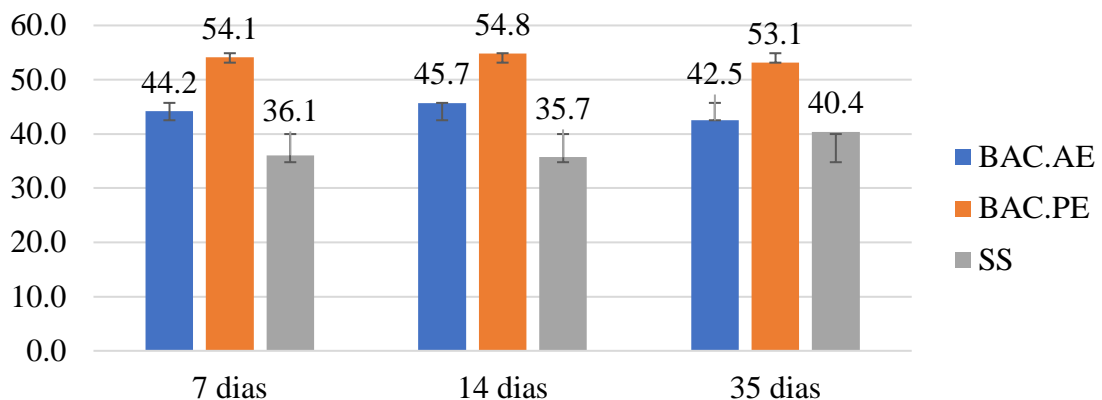


Figura 4. Resistencia a la compresión media de las muestras.

Según un estudio de Schwantes-Cezario et al (2017), con la traza utilizada en este estudio, la resistencia a la compresión encontrada en las muestras debe tener un valor promedio de 65 MPa, sin embargo, este valor no se alcanzó debido a la inserción de agregado ligero en la mezcla, ya que, según Jonkers (2011), el uso de este tipo de material reduce la resistencia a la compresión. Sin embargo, este parámetro no se puede utilizar a la hora de evaluar la mezcla SS, ya que no presenta agregados ligeros en su composición, siendo así la razón de la disminución de su resistencia asociada a la posible hidratación incompleta del cemento, debido a la baja proporción agua/cemento en la mezcla.

4.2 Análisis visual superficial

Se destacan algunas manifestaciones verificadas en las mezclas. En la mezcla BAC.PE se notó la formación de productos cicatrizantes en grietas secundarias en la muestra y su deposición superficial, ver Figura 5.

Como se puede destacar, aparentemente, la limitación de las fisuras cicatrizadas resulta de su máxima apertura. En la fisura principal evidenciada en esta muestra, no se notó la formación de

productos cicatrizantes. La bibliografía habla de que la curación se limita a fisuras más pequeñas (ZHANG et al., 2016; JIANG et al., 2020). Se notó en las muestras que el producto cicatrizante se presenta en formato de placa. La bibliografía afirma que esta forma de placa se atribuye a la presencia de calcita, producto esperado en soluciones bacterianas (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; ALGHAMRI et al., 2016). En relación a la mezcla que contiene bacterias en AE, se notó la formación de productos dentro de la grieta, como se muestra en la Figura 6.

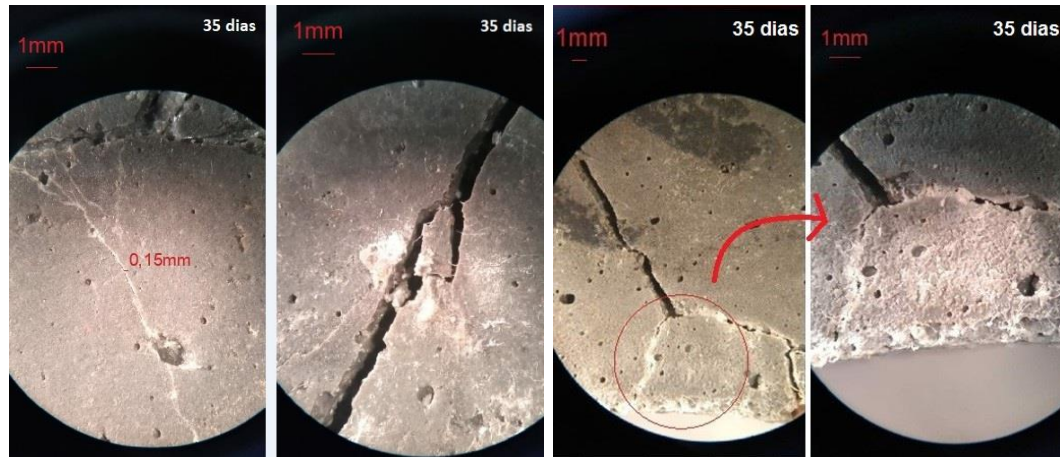


Figura 5. Autorreparación en la mezcla BAC.PE - Muestra 1.

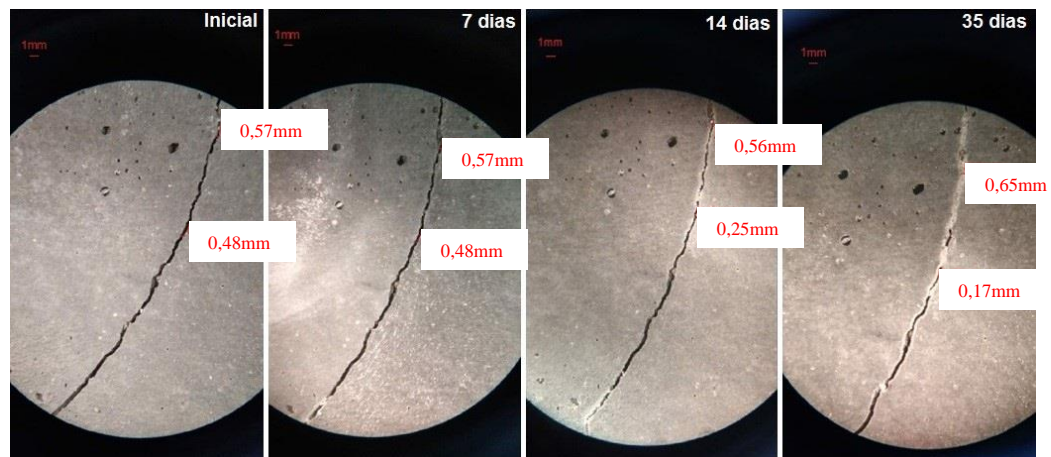


Figura 6. Autorreparación en la mezcla BAC.AE - Muestra 2.



Figura 7. Autocuración en la mezcla BAC.AE - Muestras 3 y 1.

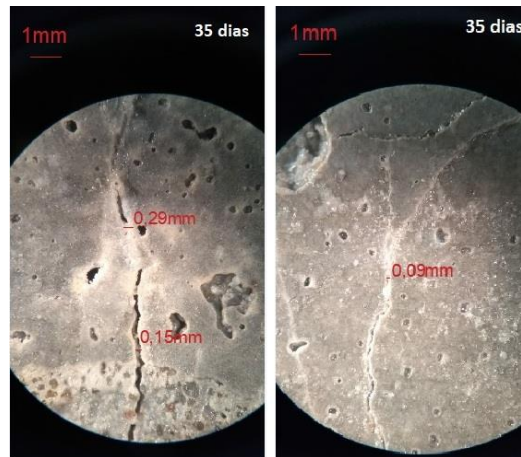


Figura 8. Autocuración en la mezcla SS: Muestras 1 y 2.

Hubo cicatrización en varios puntos a lo largo de la fisura, siendo el ancho de fisura completamente sellado más grande de 0.57 mm. Se notó el carácter progresivo de la cicatrización, siendo la hendidura inicial de 0.48 mm con solo 0.17 mm en la edad final, de acuerdo con Zhang et al. (2017). Otra observación que se puede hacer es que la distribución del producto no fue uniforme en la fisura, lo que puede resultar de la disponibilidad de perlita en el sitio para la liberación del producto de regeneración y la consecuente formación de calcita, lo cual está en línea con el estudio realizado por Alghamri et al. (2016).

En la Figura 7, se muestra la línea BAC.AE con cicatrización de 0.42 mm y 0.49 mm, respectivamente. Se observa que no solo ocurrió la formación de un producto de cicatrización, sino que también se formó en un espesor mayor que la apertura inicial, lo que indica un depósito en la superficie de la muestra. Este tipo de ocurrencia se atribuye a la presencia de calcita, como se mencionó anteriormente. Los autores Rais y Khan (2021) encuentran un aspecto similar a la cicatrización observada en esta investigación.

Con respecto a la mezcla SS, la Figura 8 muestra una fisura con una apertura inicial de 0.31 mm y una apertura final de 0.09 mm. También es importante señalar que hubo cicatrices en placas puntuales en ambas muestras, visibles al microscopio a partir de los 14 días. Esto se puede atribuir a la existencia de pequeños poros superficiales que permiten la acumulación de agua, creando así un ambiente propicio para la autocicatrización. En la mezcla SS, el espesor máximo de la fisura cicatrizada fue de 0.29 mm, presentado en la muestra 1.

Finalmente, es interesante notar que la cicatrización, en todas las muestras, ocurre principalmente de manera puntual. Este comportamiento probablemente se deba a la dispersión de las cápsulas en la estructura interna de las muestras. En la mezcla SS, pueden haber ocurrido fallas en la dispersión del silicato de sodio, lo cual está en línea con lo señalado por Van Tittelboom y Belie (2013). Además, se notó que la cicatriz comienza a formarse en la pared de la grieta, avanzando gradualmente al centro, corroborando el estudio de Al-Tabbaa et al. (2019).

Al comparar con la bibliografía, se ve que Zhang et al. (2017), recuperaron grietas de hasta 0.79 mm a los 28 días de curado, y esta diferencia probablemente se observó porque los autores utilizaron otro material regenerador, específicamente, la bacteria *Bacillus cohnii* encapsulada en perlita y recubierta con geopolímero. Asimismo, Jiang et al. (2020), al estudiar la encapsulación de *B. cohnii* en perlita expandida, lograron sellar grietas de hasta 0.4 mm, valor muy cercano a los encontrados en el presente trabajo. Liu et al (2021) informan una cicatrización de 0.25 mm.

Aún en comparación con la literatura, Van Tittelboom y de Belie (2013) prueban que no hay linealidad en la curación de fisuras, como se muestra en los resultados. Esto ocurre porque la cicatrización solo ocurre si hay material regenerador disponible, por lo que cuando no hay evidencia de curación, no hay suficiente agente regenerador disponible para que la fisura se cierre.

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para el espesor máximo cicatrizado en cada muestra de estudio.

Tabla 3. Resumen de los resultados.

Mezcla	Muestra	Espesor máximo cicatrizada
BAC.PE	1	0.16 mm
	2	0.14 mm
	3	0.12 mm
BAC.AE	1	0.38 mm
	2	0.57 mm
	3	0.42 mm
SS	1	0.29 mm
	2	0.22 mm
	3	No se produjo curación

Finalmente, podemos ver que la mezcla BAC.AE fue capaz de cicatrizar grietas con espesores significativamente mayores que las otras dos mezclas, ya que la dimensión más grande sellada por ella fue de 0.57 mm, mientras que las mezclas BAC.PE y SS curaron 0.16 mm y 0.29 mm, respectivamente. Dicho esto, se concluye que la mezcla que presentó mayor eficiencia en el análisis visual de fisuras fue la mezcla BAC.AE, por su mayor cantidad de fisuras selladas y por presentar los mayores espesores cicatrizados.

4.3 Microtomografía 3D

La prueba de microtomografía 3D se realizó en el Instituto Tecnológico de Ensayos y Seguridad Funcional (itt Fuse), de Unisinos. La Figura 9 muestra los resultados generados por microtomografía para la mezcla BAC.PE. Se puede notar que el PE utilizado en la mezcla, fácilmente detectable por la coloración amarilla, se distribuye uniformemente por toda la muestra, con solo unas pocas manchas con acumulación de agregado. Esta distribución es favorable una vez que se producen las grietas, ya que es más probable que encuentren y rompan las cápsulas de PE, liberando el agente cicatrizante. Además, presentan vacíos en un porcentaje de 11.45% en proporción al volumen total de la muestra ensayada, valor que es consistente con los resultados de compresión presentados anteriormente, ya que los concretos más porosos tienden a tener menores resistencias (YANG; JIANG, 2003).

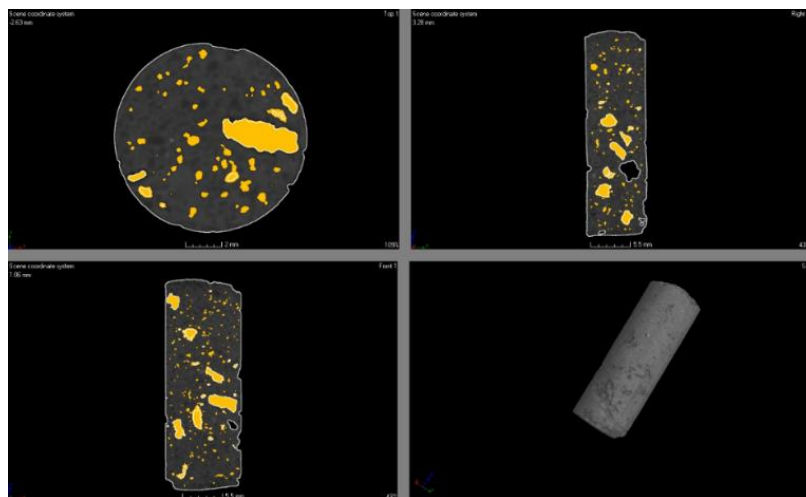


Figura 9. Microtomografía de la mezcla BAC.PE.

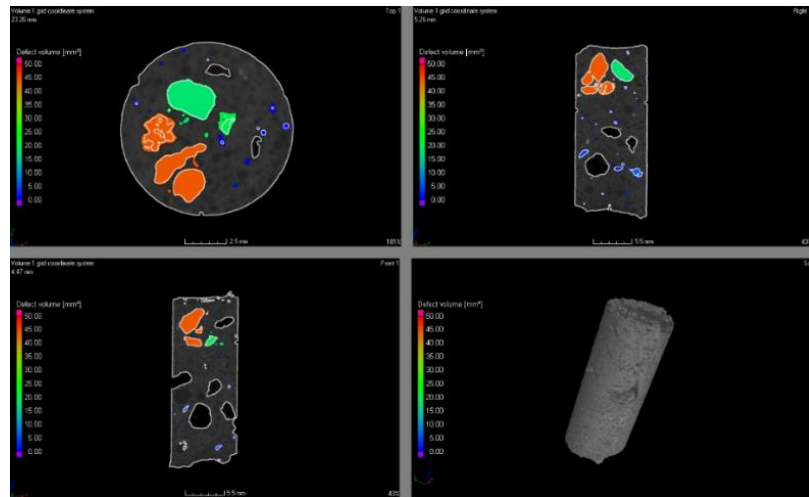


Figura 10. Microtomografía de la mezcla BAC.AE.

Se puede observar, en la Figura 10, que en la mezcla BAC.AE, existe una mala distribución de los AE en la estructura interna de la muestra ensayada, siendo los AE los puntos con diferentes colores dentro de la muestra, lo que puede haber afectado la distribución del agente curativo. El porcentaje de vacíos encontrado para esta muestra analizada es de 8.38% en proporción a su volumen, lo que puede estar relacionado con la mayor resistencia a la compresión observada para esta mezcla. Finalmente, la Figura 11 presenta los resultados de la microtomografía para la mezcla SS, donde es posible observar una adecuada distribución de los constituyentes de la mezcla a lo largo de toda la muestra, situación que, como se señaló anteriormente, es favorable para la cicatrización de la formación de producto en toda la superficie de la muestra de argamasa. El porcentaje de vacíos encontrados en esta muestra es del 2.28% en proporción a su volumen total.

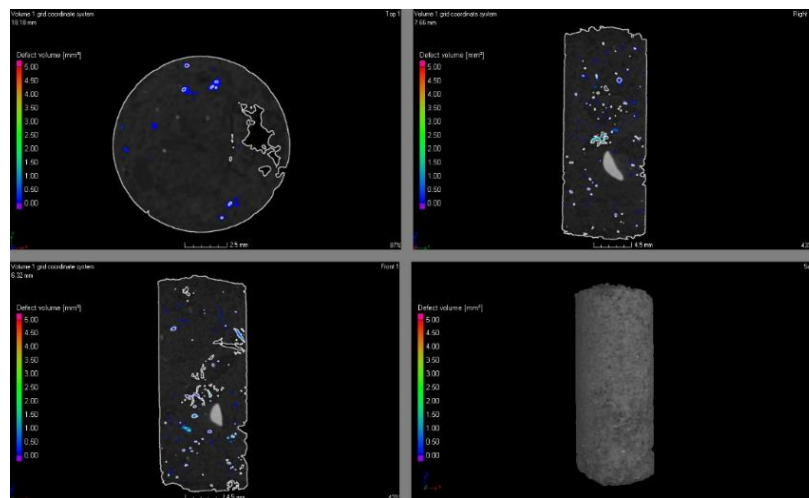


Figura 11. Microtomografía del trazo SS.

En cuanto a la microtomografía de la mezcla SS, es pertinente destacar que la muestra a la que se refiere no contiene agregados ligeros, por lo que el porcentaje de vacíos verificados se atribuye a fallas en la compactación, la presencia de una zona de transición y los vacíos entre materiales. Analizando comparativamente los vacíos de las tres muestras, se puede observar que las dos mezclas que contienen AE y PE tuvieron valores mucho más altos, ya que incluso después de la impregnación con solución bacteriana permaneció la estructura porosa del PE, lo que resultó en la identificación de vacíos. En la mezcla SS, con mayor compactación, se observó un índice mucho

menor. Al respecto, cabe mencionar que no se percibe daño en la incorporación de SS directamente a la matriz.

Como señalan Zhang et al (2021), existe una influencia en relación con la distribución de cápsulas y huecos en un concreto autorregenerador, ya que dichos puntos influyeron en la distribución del agente promotor autorregenerador. Si bien se reconoce esta influencia, no se percibió una relación entre el porcentaje de vacíos detectados y la cicatrización máxima registrada. Por tanto, es necesario analizar la distribución de los poros capilares y no su cuantificación en términos de volumen total.

Madalena, Taha y Garder (2021) evaluaron los poros del concreto autoregenerador y se dieron cuenta de que, así como se produce la cicatrización en la grieta, los productos pueden formarse en los vacíos presentes en el material. En este sentido, existe la necesidad de analizar la porosidad a lo largo del tiempo, lo que puede mejorar la microestructura del concreto, sin embargo, puede afectar la distribución del producto cicatrizante.

5. CONCLUSIÓN

La prueba de resistencia mecánica mostró que la mezcla con mejor comportamiento mecánico fue la mezcla BAC.AE, con 53.1 MPa a los 35 días, frente a 42.5 MPa y 40.4 MPa para las mezclas BAC.PE y SS, respectivamente. Además, también fue la mezcla BAC.AE la que presentó mayor capacidad de cicatrización cuando se realizó el análisis superficial de los CP, teniendo 0.57 mm como máxima fisura sellada. En las mezclas BAC.PE y SS, el valor máximo fue de 0.16 mm y 0.29 mm, respectivamente.

Hubo formación de productos dentro de las fisuras, principalmente en la línea SS. La cicatrización de grietas se produjo de forma más puntual que a lo largo de toda su extensión.

Mediante el análisis de la microtomografía 3D, se pudo comprobar que los materiales constituyentes de la argamasa se encontraban bien dispersos dentro de las matrices cementicias.

Así, con todos estos datos, es posible concluir que la mezcla más eficiente, en general, fue la mezcla BAC.AE. Sin embargo, desde el punto de vista de la producción y aplicación a gran escala, existen beneficios y la posibilidad de utilizar la mezcla SS, ya que los procedimientos involucrados en la impregnación de las cápsulas se eliminan del proceso de producción del hormigón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a itt Performance por su apoyo en la realización de esta investigación.

7. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), *NBR NM 45: Agregados - Determinação da*

massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M. S. (2011), *Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 38:1229-1234, <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-010-0901-8>

Al-Tabbaa, A., Litina, C., Giannaros, P., Kanellopoulos, A., Souza, L. (2019), *First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 208:669-685, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>

Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016), *Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 124:910-921, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>

Carmona Filho, A., Carmona, T. (2013), “*Fissuração nas estruturas de concreto*”. Boletim Técnico ALCONPAT Internacional.

Cappellesso, V. G. (2018), “*Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Chemrouk, M. (2015), *The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete*. Procedia Engineering. 125:713-724, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.112>

Gupta, S., Pang, S. D., Kua, H. W. (2017), *Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review*. Construction and Building Materials. 146:419-428, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>

JIANG, L. et al. *Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications*. Construction and Building Materials, v. 232, p. 117222, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117222>

Jonkers, H. M. (2011), *Bacteria-based self-healing concrete*. Frankfurter Afrikanistische Blätter. 8:49-79.

Jonkers, H. M., Thijssen, A. (2010). “*Bacteria Mediated Remediation of Concrete Structures*” in: K. van Breugel, G. Ye, Y. Yuan (Eds.), 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, [S. l.], pp. 833-840.

Krishnapriya, S., Babu, D. L. V., Arulraj, G. P. (2015), *Isolation and identification of 60 bacteria to improve the strength of concrete*. Microbiological Research. 174:48-55, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.03.009>

Li, V. C., Herbert, E. (2012), *Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure*. Journal of Advanced Concrete Technology. 10:207-218, <https://doi.org/10.3151/jact.10.207>

LIU, C et al. (2021), *Experimental and analytical study on the flexural rigidity of microbial self-healing concrete based on recycled coarse aggregate (RCA)*. Construction and Building Materials, Vol 85, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122941>

Lottermann, A. F. (2013), “*Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso*”, Monografia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, p. 66.

Maddalena, R., Taha, H., Gardner, D. (2021), *Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: sorptivity and pore structure*. Developments in the built environment, Vol 6, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100044>

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. IBRACON, São Paulo, Brasil, p. 782.

Milla, J. et al. (2019), *Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate*. Construction and Building Materials, v. 201, p. 526–538, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.193>

- Pacheco, F. (2020), “Análise da confiabilidade dos mecanismos de autorregeneração do concreto em ambientes agressivos de exposição”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, p. 348.
- Patel, P. (2015), *Helping Concrete Heal Itself*. ACS Central Science. 1(9):470-472.
- Pelletier, M. M., Brown, R., Sshukla, A., Bose, A. (2011), *Selfhealing concrete with a microencapsulated healing agent*. University of Rhode Island, Kingston, RI, USA.
- Rais, M. S., Khan, R. A. (2021), *Experimental investigation on the strength and durability properties of bacterial self-healing recycled aggregate concrete with mineral admixtures*. Construction and Building Materials. Vol 306, Nov 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124901>
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S. (2001), *Remediation of concrete using microorganisms*, ACI Mater. J. 98(1).
- Schwantes-Cezario, N., Nogueira, G. S. F., Toralles, B. M. (2017), *Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de B. subtilis AP91*. Revista de Engenharia Civil IMED. 4(2):142-158, <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2017.v4i2.2072>
- Seifan, M., Samani, A. K. and Berenjian, A. (2016), *Bioconcrete: next generation of selfhealing concrete*, Applied Microbiology and Biotechnology. 100:2591-2602, <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Fraaij, A. (2011), *Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a selfhealing agent in blast furnace slag mortar*. Heron. 56(1-2):17-36.
- Souradeep, G., Kua, H. W. (2016), *Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering. 25:864-870, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001687)
- Stanaszek-Tomal, E. (2020), *Bacterial Concrete as a Sustainable Building Material?* 2020. Sustainability, 12, 696; <http://doi:10.3390/su12020696>
- Tittelboom, K. V., De Belie, N. (2013), *Self-Healing in Cementitious Materials - A Review*. Materials. 6:2182-2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
- Van Breugel, K. (2007). “*Is there a market for self-healing cement-based materials?*” in: First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee (Netherlands), pp. 1-9.
- Xu et al. (2020), *Application of ureolysis-based microbial CaCO₃ precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion*. Construction and Building Materials, Vol 265, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120364>
- Wan, P, et al. (2021), *Self-healing properties of asphalt concrete containing responsive calcium alginate/nano-Fe₃O₄ composite capsules via microwave irradiation*. Construction and Building Materials, Vol 310, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125258>
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Vlierbergue, S. V., Verstraete, W., De Belie, N. (2014), *X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete*. Cement and Concrete Composites. 53:289-304, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.014>
- Wang, J. et al. (2017), *Bacillus sphaericus LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete*. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 101, n. 12, p. 5101–5114, <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8260-2>
- Yang, J., Jiang, G. (2003), *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*, Cement and Concrete Research. 33:381-386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)
- Zhang, X et al. (2021), *Effects of carrier on the performance of bacteria-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials, Vol 305, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124771>

Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de carbonatación

R. Costa^{1*} , A. Franchetto¹ , A. Gouveia¹ , F. Ziegler¹ , K. Pessoa¹ , M. Garcez¹ 

*Autor de Contacto: rayarapintocosta@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

Recepción: 14/09/2021 | Aceptación: 02/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Este artículo evalúa la variabilidad en la predicción de la vida útil de estructuras de concreto a través de cuatro modelos que estiman el avance natural del frente de carbonatación. Los resultados muestran que hay variabilidad en el frente de carbonatación estimado. Los modelos de Possan (2010) y Eklou (2018) presentan valores estimados cercanos a los medidos, mientras que Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) tienden, respectivamente, a subestimar y sobreestimar el frente natural de carbonatación. Solo se consideran concretos sin la adición de materiales cementicios suplementarios debido a las limitaciones de los modelos. La resistencia a la compresión, concentración de CO₂ y la humedad relativa del aire presentan una influencia significativa en los resultados, y la variabilidad depende de qué parámetros se consideran en los modelos.

Palabras clave: carbonatación; predicción de vida útil; frente de carbonatación; durabilidad del concreto.

Citar como: Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M. (2022), "Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de carbonatación", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 47 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

¹ Núcleo orientado para a inovação da construção (NORIE), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo los autores A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez contribuyeron a la concepción de la idea y metodología del estudio con 16,66% de participación. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa participaron en la investigación y el análisis formal de los resultados con 20% de participación. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez aportaron contribuciones al manuscrito en la discusión de los resultados con 16,66% de participación.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Service life prediction for concrete structures based on carbonation front depth models

ABSTRACT

This paper seeks to evaluate the variability in predicting the service life of concrete structures through four models that estimate the natural advance of the carbonation front. The results show that there is variability in the estimated carbonation front. The models by Possan (2010) and Ekolu (2018) show estimated values close to measured ones, while Ho and Lewis (1987) and Bob and Affana (1993) tend to underestimate and overestimate the natural carbonation front, respectively. Only concretes without added supplementary cementitious materials were considered, due to model limitations. Compressive strength, CO₂ concentration and relative humidity have significant influence on the results and the variability depends on which parameters are considered in the models.

Keywords: carbonatation; service life prediction; carbonatation depth; concrete durability.

Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação

RESUMO

Este artigo busca avaliar a variabilidade na previsão da vida útil de estruturas de concreto através de quatro modelos que estimam o avanço natural da frente de carbonatação. Os resultados mostram que há variabilidade na frente de carbonatação estimada. Os modelos de Possan (2010) e Ekolu (2018) apresentam valores estimados próximos aos medidos, enquanto Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) tendem, respectivamente, a subestimar e superestimar a frente natural de carbonatação. Somente concretos sem adição de materiais cimentícios suplementares foram considerados, por limitações dos modelos. A resistência à compressão, concentração de CO₂ e umidade relativa do ar têm influência significativa nos resultados e a variabilidade depende de quais parâmetros são considerados nos modelos.

Palavras-chave: carbonatação; previsão de vida útil; frente de carbonatação; durabilidade do concreto.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La carbonatación es un fenómeno generado por la interacción del concreto con el ambiente. Ocurre cuando hay una reacción del dióxido de carbono (CO_2) del aire con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), producto de la hidratación del cemento, y que propicia una alta alcalinidad en la solución intersticial del concreto, formando el carbonato cálcico (CaCO_3). El cemento Portland hidratado presente en el concreto tiene un pH alcalino (12-13), debido principalmente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sin embargo, con la formación de CaCO_3 ocurre una reducción de ese pH a valores como 9,4, que a la temperatura ambiente propicia la precipitación de CaCO_3 . Entonces, esa acidificación de la matriz cementicia causa la despasivación de la armadura, dejándola susceptible a procesos corrosivos. La corrosión es la principal manifestación patológica en las estructuras de concreto armado (Peter *et al.*, 2008; Chen, 2019).

Los principales factores que afectan la carbonatación y su velocidad son: temperatura, humedad relativa del ambiente (HR), concentración de CO_2 , revestimiento de la superficie, factor agua/cemento, tipo de cemento utilizado, proporción de cemento y agua utilizado, condiciones de curado y grado de hidratación de la matriz, permeabilidad del concreto y red de poros (Ribeiro *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Song; Kwon, 2007; Houst; Wittmann, 2002). A edades tempranas (hasta 28 días, por lo general), la carbonatación presenta baja incidencia. Sin embargo, con un tiempo de exposición más largo al ambiente saturado con CO_2 , la carbonatación se hace más evidente y puede manifestarse en gran parte de la estructura de concreto (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Según la norma brasileña *NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1* (traducción: NBR 15575-1: Edificaciones Habitacionales – Desempeño Parte 1) (ABNT, 2013), la vida útil (VU) es el período en el que un edificio y/o sus sistemas se prestan a las actividades para las que fueron diseñados y construidos, cumpliendo con los niveles de desempeño establecidos en esa norma. Para la determinación de la VU de las estructuras de concreto carbonatadas, se procede a la aplicación de modelos basados en ecuaciones matemáticas a fin de mensurar la profundidad de carbonatación y así descubrir la velocidad a la que ese frente de carbonatación avanza hacia el interior de la estructura (Possan, 2010).

Los modelos que estiman la profundidad de carbonatación presuponen que el concreto es homogéneo. En la práctica eso no ocurre, pues su consistencia depende del tiempo de compactación y curado, además de las condiciones de la (HR) del ambiente. Ese supuesto asegura que las propiedades determinantes de la tasa de carbonatación sean semejantes en todas las profundidades del concreto, lo que simplifica los cálculos (Köliö *et al.*, 2014).

No hay un modelo que representa fielmente el comportamiento de la carbonatación en el concreto, y eso se debe a los diferentes factores explicados anteriormente. Por lo tanto, la elección de qué modelo se debe aplicar depende de las características del objeto de estudio y de las variables del modelo.

En ese sentido, este trabajo analiza la variabilidad en la predicción de la VU a través de cuatro modelos que estiman la profundidad de la carbonatación. El estudio se realiza a partir de la base de datos de ensayos realizados bajo condiciones naturales de envejecimiento y exposición encontrados en la literatura. Se aplicó un análisis de sensibilidad para la identificación de los parámetros que más influyen en las variaciones encontradas entre los valores estimados por los modelos y obtenidos experimentalmente. Este estudio busca, sobre todo, contribuir con la comunidad técnico-científica en el tema de las manifestaciones patológicas, especialmente en la definición de modelos que puedan estimar mejor el avance del frente de carbonatación, auxiliando en la toma de decisiones relativas a la durabilidad y vida útil de las estructuras de concreto armado en la etapa de diseño.

2. MÉTODO

El método utilizado se divide en: *i*) selección de modelos matemáticos de la literatura para predecir la profundidad de carbonatación en concretos; *ii*) creación de una base de datos de concretos a partir de estudios de la literatura; *iii*) análisis comparativo de los modelos; *iv*) análisis de sensibilidad para comprender las respuestas de los modelos de predicción de profundidad de carbonatación, de acuerdo con las variables que considera cada modelo.

2.1 Modelos de estimación de la profundidad de carbonatación

2.1.1 Modelo de Possan (2010)

El modelo de Possan (2010) considera los factores que influyen en la carbonatación, además de presentar datos de entrada fácilmente obtenibles según la ecuación 1. La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); k_c es un factor variable según el tipo de cemento (Tabla 1); f_c es la resistencia media a la compresión (MPa); k_{fc} es el factor variable a la resistencia a la compresión axial del concreto (Tabla 1); t es la edad (años); ad es la proporción de adición puzolánica (% en relación a la masa de cemento); k_{ad} es el factor variable referente a las adiciones puzolánicas del concreto (Tabla 1); CO_2 es la proporción de CO_2 de la atmósfera (%); k_{CO_2} es el factor variable referente a la proporción de CO_2 del ambiente (Tabla 1); HR es la media del ambiente (%*0.01); k_{ur} es el factor variable referente a la HR (Tabla 1); y k_{ce} es el factor variable referente a la exposición a la lluvia (Tabla 2).

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40+f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right) + \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR-0,58)^2}{100+f_c}\right) \right] \cdot k_{ce} \quad (1)$$

Tabla 1. Coeficientes del modelo Possan (2010) por tipo de cemento

Tipos de cemento	Características del concreto			Características del ambiente	
	Cemento	f_c	Adición	CO_2	HR
	(k_c)	(k_{fc})	(k_{ad})	(k_{CO_2})	(k_{ur})
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Fuente: Possan, 2010.

Tabla 2. Coeficientes del modelo Possan (2010) en función de las condiciones de exposición

Tipo de exposición	k_{ce}
Ambiente interior protegido de la lluvia	1,3
Ambiente externo protegido de la lluvia	1
Ambiente externo desprotegido de la lluvia	0,65

Fuente: Possan, 2010.

2.1.2 Modelo de Ekolu (2018)

El modelo matemático de Ekolu (2018) considera varios parámetros relacionados a la carbonatación, como la HR y la temperatura del ambiente, la concentración de CO_2 , la protección

de la estructura y la incidencia de lluvia, y estima la profundidad de carbonatación a partir de cinco ecuaciones aplicadas en secuencia. La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); e_h es el coeficiente relacional referente a HR; e_s es el coeficiente relacional referente a la resistencia a la compresión del concreto; e_{co} es el coeficiente relacional referente a la concentración de CO₂ en el ambiente; $F_{c(t)}$ es la función de crecimiento de la resistencia del concreto; t es el tiempo de exposición del concreto (años); g es el factor dependiente del tipo de cemento; y RH es la HR media del ambiente (%).

$$y = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot 1000 \cdot F_{c(t)}^g \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$e_h = 16 \cdot \left(\frac{RH-35}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1,5} \rightarrow 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (3)$$

$$e_s = \begin{cases} 1,0 \rightarrow \text{Exposição externa protegida} \\ f_{c28}^{-0,2} \rightarrow \text{Exposição externa desprotegida} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha f_{c28}^r \rightarrow 20 < f_c < 60 \text{MPa} \\ 1,0 \rightarrow f_c > 60 \text{MPa} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{c(t)} = \frac{t}{a+bt} \cdot f_c \rightarrow f_c = f_{c28} \text{ ou } f_{cbn} \quad (6)$$

Para que se encuentre el " e_{co} ", se utiliza la ecuación 5, insertando, si necesario, la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de curado (f_{c28}) y los respectivos coeficientes de corrección " α " y " r " de la Tabla 3. $F_{c(t)}$ se obtiene mediante la ecuación 6, y sus coeficientes "a" y "b" (Tabla 4) dependen de los valores de resistencia del concreto considerados (f_{c28} , considerada la resistencia del concreto a los 28 días, y f_{cbn} , considerada la resistencia del concreto a largo plazo), así como las edades del concreto considerado. Los coeficientes "g" aplicados en la ecuación 2 se deben consultar en la Tabla 5.

Tabla 3. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de e_{co}

Coeficientes	Concentración de CO ₂ de la atmósfera (ppm)				
	200	300	500	1000	2000
α	1,40	1,00	2,50	4,50	14,00
r	-0,25	0,00	-0,25	-0,40	-0,67

Fuente: Ekolu, 2018.

Tabla 4. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de $F_{c(t)}$

Resistencia a la compresión	Edad del concreto	a	b
f_{c28}	$t < 6$ años	0,35	$0,6 - t^{0,5}/50$
	$t > 6$ años	$0,15t$	$0,5 - t^{0,5}/50$
f_{cbn}	$t < 15$ años	0,35	$1,15 - t^{0,6}/50$
	$t > 15$ años	$0,15t$	$0,95 - t^{0,6}/50$

Fuente: Ekolu, 2018.

Tabla 5. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de g

Materiales suplementarios del cemento (MSC)	Tipos de cemento*	Factor de conductancia "g"
20% (MSC)	CEM I, CEM II/A	-1,5

30% ceniza volante	CEM II/B, CEM IV/A	-1,4
50% escoria	CEM III/A	
* Según la norma británica BS EN 197-1		

Fuente: Ekolu, 2018.

2.1.3 Modelo de Ho e Lewis (1987)

El modelo de Ho y Lewis (1987) es una optimización del modelo de Tuutti (1982), con un parámetro para la carbonatación inicial agregado en la ecuación, como se observa en la ecuación 8. La profundidad carbonatada está representada por el factor e_c (mm); e_0 es la profundidad de carbonatación inicial (mm); k es el coeficiente de carbonatación (mm/ano)^{0,5}; y t es el tiempo (años).

$$e_c = e_0 + k\sqrt{t} \quad (7)$$

El modelo de Ho y Lewis (1987) no informa cómo determinar el coeficiente de carbonatación (k). Así, se desarrollaron diferentes propuestas para la determinación de ese coeficiente, como el modelo de Helene (1997), que tiene en cuenta el tipo de cemento utilizado, la concentración de CO₂ en el ambiente y la resistencia a la compresión del concreto (ecuaciones 8, 9 y 10). El coeficiente de carbonatación está representado por el factor k (mm/ano)^{0,5}; fck es la resistencia a la compresión (MPa); y CCO_2 es la concentración de CO₂ (%).

Concretos en general (ecuación 9):

$$k = (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (8)$$

Concretos con cemento puzolánico (ecuación 10):

$$k = 1,1 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (9)$$

Concretos con cemento de alto horno (ecuación 11):

$$k = 1,2 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (10)$$

2.1.4 Modelo de Bob e Affana (1993)

El modelo de Bob y Affana (1993) también se basa en el modelo desarrollado por Tuutti (1982), pero los autores se dieron cuenta de que la profundidad de carbonatación del concreto estaba relacionada con más factores, como la HR del aire, el tipo de cemento y la resistencia a la compresión del concreto. El modelo se presenta en la ecuación (11). La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); c es el coeficiente del tipo de cemento (Tabla 6); k es el coeficiente dependiente de la HR del aire (Tabla 6); fc es la resistencia a la compresión del concreto (MPa); t es el tiempo (años); y d es el coeficiente referente a la cantidad de CO₂ (Tabla 6).

$$y = 150 \cdot \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{fc}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

Tabla 6. Coeficientes k , d y c del modelo Bob e Affana (1993)

Humedad relativa	k
HR \leq 60	1,0
70 \leq HR \leq 75	0,7
80 \leq HR \leq 85	0,5
HR \geq 90	0,3
Cantidad de CO₂	d
CO ₂ \leq 0,03%	1,0
0,03 < CO ₂ \leq 0,1%	2,0
Tipo de cemento	c
Cemento Portland CP40 y CP45	0,8
Cemento Portland CP50 y CP55	1,0
Cemento Portland + 15% de adiciones minerales	1,2
Cemento Portland + 30% de adiciones minerales	1,4
Cemento Portland + 50% de adiciones minerales	2,0

Fuente: Bob y Affana, 1993.

2.2 Base de datos

Para la creación de la base de datos se realizó una búsqueda bibliográfica en las literaturas nacional brasileña e internacional. A partir de esos trabajos, que evaluaron diferentes muestras de concreto bajo los efectos de la carbonatación natural, se seleccionaron un total de 300 datos. Posteriormente, con ese grupo de datos, se realizó una nueva selección de los datos que efectivamente podrían ser utilizados en los modelos matemáticos de carbonatación utilizados en este trabajo, mencionados en el ítem 3.1. A partir de esos datos de diferentes concretos, se utilizaron 24 para el desarrollo del presente trabajo, presentados en la Tabla 7, donde el término TE corresponde al tiempo de exposición y c_e , a la profundidad carbonatada.

Tabla 7. Base de datos

Datos	TE (años)	a/c	Cemento	fck 28 (MPa)	CO₂ (%)	HR (%)	Exposición	c_e (mm)
Possan (2010)	7,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepll	12,01
	12,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepll	15,1
Pauletti (2009)	2,50	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedll	1,31
	4,83	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedll	2,00
Tasca (2012)	2,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	0,92
	4,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	1,41
	14,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	6,35
Nardino et al. (2018)	3,33	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	6,00
	6,41	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	8,10
	7,80	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	7,44
Rozière et al. (2009)	1,00	0,63	CP V*	47,80	0,053	0,50	aedll*	1,20
	1,00	0,63	CP V*	36,20	0,053	0,50	aedll*	10,90
Ribeiro et al.	10,00	0,65	CP V	32,30	0,015	0,55	aedll	11,90

(2018)	10,00	0,44	CP II F	54,20	0,015	0,55	aedll	3,00
Sanjuan et al.	2,00	0,69	CP V	17,00	0,030	0,50	aipll	7,00
(2003)	2,00	0,49	CP V	28,00	0,030	0,50	aipll	5,00
	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aedll	7,56
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	12,86
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	13,89
Ferreira	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	13,57
(2013)	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	10,00
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	15,36
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	16,80
	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	15,96

HR: humedad relativa; aepll: ambiente exterior protegido de la lluvia; aedll: ambiente exterior desprotegido de la lluvia; aipll: ambiente interior protegido de la lluvia; TE: tiempo de exposición; ec: profundidad carbonatada; *dato estimado.

2.3 Comparación de los modelos y análisis de sensibilidad

Se realizó una comparación de la profundidad de carbonatación real (mm) en relación a la profundidad de carbonatación estimada, y se cuantificó un error (mm y %). Además, se determinó el nivel de sensibilidad de los modelos, teniendo en cuenta tres factores: resistencia a la compresión (MPa); concentración de CO₂ en el ambiente (%); HR del ambiente (%). A partir de esos criterios, se realizó una simulación de escenarios de carbonatación natural, en los que variaron en proporción los factores, mientras que otras variables permanecieron fijas. Los factores estipulados para los escenarios se definieron con base en las informaciones obtenidas en la base de datos. Las profundidades de carbonatación se delimitaron por un período de 50 años. Teniendo en cuenta esos factores, se determinaron tres escenarios, los cuales se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción de los escenarios A, B y C

Escenario A: varía la resistencia a la compresión a los 28 días				
Resistencia a la compresión (MPa)	40		20	
Humedad relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,035		0,035	
Tipo de ambiente	Interior		Interior	
Tipo de cemento	CP V		CP V	
Escenario B: varía el dióxido de carbono del medio ambiente				
Resistencia a la compresión (MPa)	40		40	
Humedad relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,03		0,07	
Tipo de ambiente	Interior		Interior	
Tipo de cemento	CP V		CP V	
Escenario C: varía la humedad relativa del medio ambiente				
Resistencia a la compresión (MPa)	40	40	40	40
Humedad relativa (%)	30	50	70	90
Dióxido de carbono (%)	0,035	0,035	0,035	0,035
Tipo de ambiente	Interior	Interior	Interior	Interior
Tipo de cemento	CP V	CP V	CP V	CP V

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 1 (a) muestra que existe una tendencia en la que generen los modelos resultados diferentes a los observados en los experimentos. Esas observaciones son más explícitas para el modelo de Bob y Affana (1993), que sobrestimó las profundidades de carbonatación, y el modelo de Ho y Lewis (1987), que las subestimó.

Los datos presentados en la Figura 1 (b) permiten comparar las profundidades estimadas por cada modelo, en relación a las profundidades reales medidas.

La línea roja punteada representa resultados iguales para los valores estimados y obtenidos experimentalmente: los puntos por encima de la línea representan valores sobreestimados por el modelo, mientras los valores debajo de la línea representan estimaciones subestimadas para la profundidad de carbonatación.

Se puede notar que el modelo de Ho y Lewis (1987) resulta en valores que subestiman más evidentemente las profundidades y que el modelo de Bob y Affana (1993) las sobreestima. Los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018), por otro lado, se acercan a la línea punteada, ya que los valores estimados son más consistentes con los obtenidos en los experimentos, y subestiman la profundidad de carbonatación.

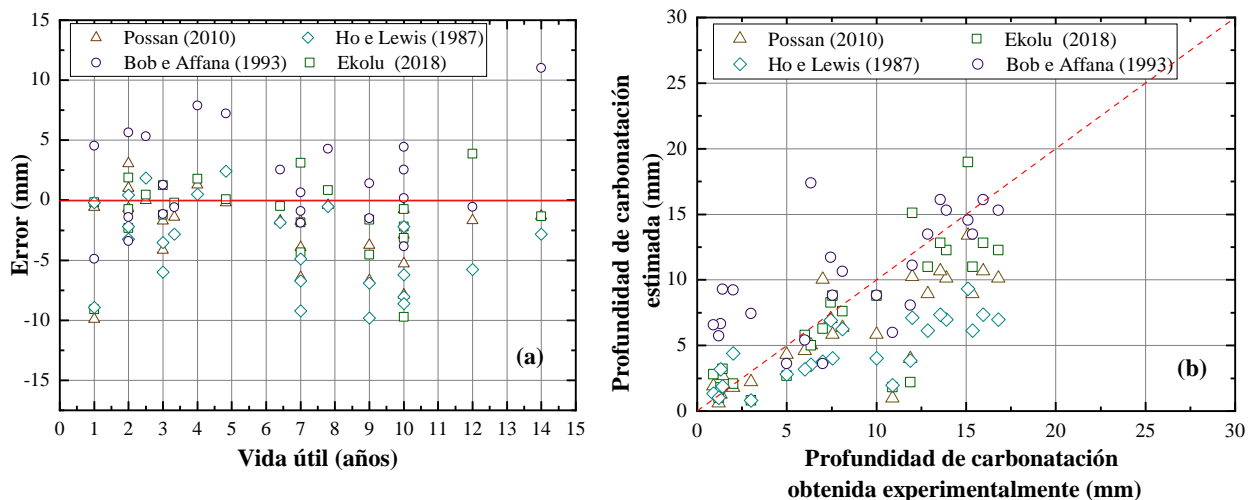


Figura 1. Errores para las profundidades de carbonatación en función del tiempo (a) y comparación entre la profundidad de carbonatación estimada y la obtenida experimentalmente (b)

La Figura 2 (a) contiene los resultados del análisis de sensibilidad de los modelos con respecto a la resistencia a la compresión, considerando valores de 20 y 40 MPa en el proceso de carbonatación natural durante un período de 50 años. En esa figura se presentan las profundidades de carbonatación y el tiempo de VU, siendo indicada la cobertura mínima de 25 mm estipulada por la norma brasileña NBR 6118 (2014) para las estructuras en ambiente urbano (clase de agresividad II, moderada).

En todos los modelos del escenario A, el crecimiento de la resistencia a la compresión del concreto resulta en menores profundidades de carbonatación. Ese comportamiento es consistente con el predicho en la literatura, ya que menores relaciones agua/concreto están directamente relacionadas con la reducción de la porosidad de la matriz, lo que reduce la profundidad de carbonatación y es un factor determinante de la resistencia del concreto (Tuutti, 1982; Ho y Lewis, 1987; Kulakowski, 2002).

La reducción de la profundidad de carbonatación provocada por el aumento de la resistencia a la compresión de concretos de 20 a 40 MPa, considerándose resultados para el mismo período de

tiempo, es de aproximadamente el 68,55%, 70,3%, 49,97% y 50% para los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho y Lewis (1987), Bob y Affana (1993), respectivamente. Esos valores se obtienen fijándose las variables de las fórmulas de cada método, variándose solo la resistencia a la compresión. Eso muestra que el factor de resistencia a la compresión ejerce mayor influencia en las profundidades de carbonatación estimadas por los modelos de Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993). Además, los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) predicen que el concreto de 20 MPa no conseguiría cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario A. En cuanto a los demás modelos, el concreto de 20 MPa ya cumpliría ese requisito.

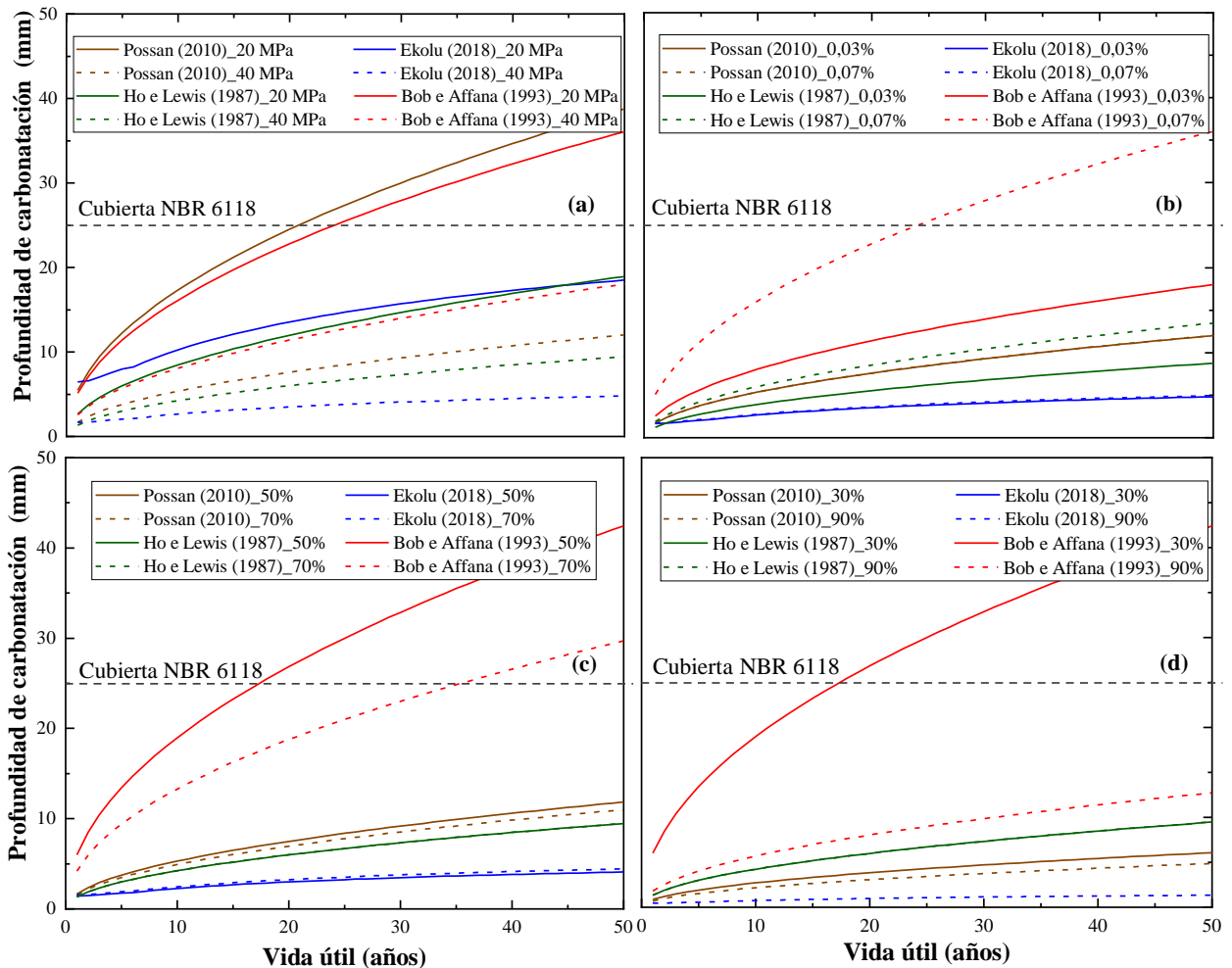


Figura 2. Tiempo de vida útil y profundidad de carbonatación en relación a la resistencia a la compresión. Escenario A: (a) dióxido de carbono en el medio ambiente; escenario B: (b) humedad relativa del 50% y el 70%; escenario C: (c) humedad relativa del 30% y el 90%; escenario C: (d).

La Figura 2 (b) muestra la sensibilidad de los modelos en relación a la proporción de CO₂ presente en el ambiente. Los niveles de CO₂ se delimitaron a partir de los valores obtenidos en la base de datos y en las definiciones presentadas en el trabajo de Possan (2010). Se estipularon, entonces, concentraciones del 0,03% y 0,07% en el proceso de carbonatación natural durante el período de 50 años. Pires (2016) presenta la concentración de CO₂ como uno de los factores intervinientes en el proceso de carbonatación del concreto y Cadore (2008) sugiere que la velocidad de penetración del frente de carbonatación está directamente relacionada con la concentración de CO₂ en el

ambiente, es decir, se eleva la velocidad de la carbonatación con el aumento de la concentración de CO₂.

Se observa en la Figura 2 (b) que, aunque la carbonatación crezca con la elevación de los niveles de CO₂, en los modelos de Possan (2010) y Ho y Lewis (1987) ese crecimiento se muestra menor. El incremento de la profundidad de carbonatación provocada por el crecimiento del nivel de CO₂ del ambiente, considerándose sus promedios, es de aproximadamente el 0,17%, 2,89%, 53,84% y 100% para los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) respectivamente. Ese resultado indica que el factor CO₂ de los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018) ejercen menos influencia en las profundidades de carbonatación estimadas para el escenario B, en comparación con los otros modelos mencionados. El modelo de Bob y Affana (1993) sugiere que, en ambientes con el 0,07% de CO₂, el concreto no conseguiría cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario B.

La Figura 2 (c) ilustra la sensibilidad a la HR ambiental en el proceso de carbonatación natural durante 50 años. Las HR seleccionadas son valores extremos encontrados en la literatura para los procesos de carbonatación natural. Esas proporciones fueron seleccionadas inicialmente porque son valores extremos encontrados en la base de datos de carbonatación natural construida a partir de la literatura (Pauletti, 2009; Tasca, 2012; Rozière, 2009; Nardino, 2019).

En el escenario C, se verifica que el aumento de la HR del ambiente resulta en una reducción de la profundidad de carbonatación para los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993). Sin embargo, mientras el modelo de Possan (2010) presenta una disminución del 7,16% en términos de promedio, el de Bob y Affana (1993) muestra una reducción del 30%. Eso sugiere que el método de Bob y Affana (1993) tiene una mayor sensibilidad a esa variable. En el modelo de Ekolu (2018) ocurre un crecimiento en la profundidad de carbonatación del 8,44%, considerando los promedios. En el modelo de Ho y Lewis (1987), por otro lado, los valores de carbonatación permanecen sin cambios con el aumento del 20% en la HR. Eso se explica debido a que el modelo de Ho y Lewis (1987) no posee entrada de datos para la HR, por lo tanto la ecuación es insensible a ese factor.

La HR del ambiente es un factor relevante para el proceso de carbonatación y se la debe contabilizar directa o indirectamente en los modelos de predicción de la VU por carbonatación natural. En ese fenómeno, el agua presente en los poros es responsable de disolver el CO₂, formando el ácido carbónico (H₂CO₃) y Ca(OH)₂, producto de la hidratación del cemento. El resultado es la formación de CaCO₃ (Pauletti, 2009). El volumen y la composición del agua de los poros están influenciados por factores como la relación agua/cemento, el tiempo de curado, la temperatura e, incluso, la HR del ambiente, un factor evaluado aquí (Vieira et al., 2016).

La literatura también indica que los ambientes con HR baja o excesiva no son propicios para el proceso de carbonatación natural. En la primera situación, los poros del concreto se rellenarían de agua, lo que dificultaría la penetración del CO₂ para formar H₂CO₃. Por otro lado, en condiciones de baja HR, el agua en los poros del concreto sería insuficiente para generar tasas de carbonatación natural más aceleradas, ya que se necesita de agua para generar H₂CO₃ (Félix et al., 2017; Possan et al., 2017; Elsalamawy et al., 2019; Dierfeld et al., 2020).

Considerándose el escenario C, los resultados de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) muestran una reducción en las profundidades de carbonatación debido al crecimiento de la HR de 50 para 70%, que sugieren que la saturación de poros se predice en esos rangos de HR del ambiente. Por el contrario, los resultados obtenidos por Ekolu (2018) sugieren que esos niveles de HR favorecen el proceso de carbonatación. En este sentido, Chen et al., (2018) observaron un aumento en la profundidad de la carbonatación con un aumento de la HR del ambiente, con un pico de alrededor del 70%. Los datos adquiridos por medio del método de Ekolu (2018) en el escenario C siguen al sugerido por estos autores.

Para una mejor comprensión, se probaron los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018) y Bob y Affana (1993) en el escenario C, considerándose el 30% y el 90% de HR. Los resultados se

muestran en la Figura 2 (d). Para el método de Possan (2010), se obtienen profundidades de carbonatación inferiores en rangos de HR del 30% y el 90% en comparación a niveles del 50% y el 70%. Mientras los promedios de profundidad de carbonatación de 50 años para el 50% y el 70% de HR son del 8,01mm y el 7,43 mm, respectivamente, para el 30% y el 90% de HR son del 4,10 mm y el 3,28 mm respectivamente. Eso indica que el modelo es sensible a condiciones de HR excesiva y baja.

Asimismo, en el modelo de Ekolu (2018), el nivel del 30% genera valores negativos, mientras que el 90% predice resultados significativamente inferiores al 50% y al 70%. Por lo tanto, se sugiere que ese modelo reconozca el rango de HR del 50% y el 70% como el más propicio para el proceso de carbonatación. Para el modelo de Bob y Affana (1993), el 30% de UR resulta en una profundidad de carbonatación igual a la condición del 50%. Eso ocurre porque el modelo de Bob y Affana (1993) no tiene como dato de entrada la HR, sino coeficientes determinados en base a los rangos de HR. De ese modo, se utiliza el mismo coeficiente (1,0) para HRs iguales o inferiores al 60%, entonces el modelo no es sensible a HRs inferiores a ese valor. Lo mismo sucede con valores iguales o superiores al 90%, con los que se adopta el coeficiente 0,3. Sin embargo, el modelo considera que para $RH \leq 60\%$ la profundidad de carbonatación es superior que la condición con $RH > 90\%$. Para el 30% se obtuvo un promedio de profundidad de carbonatación para 50 años de 28,68 mm, mientras que para el 90% se encontró un 8,6 mm. La Figura 2 (c) también indica que, según el modelo de Bob y Affana (1993), concretos en ambientes con el 50% y el 70% de HR no conseguirían cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario C. Además, según el modelo de Bob y Affana (1993), el concreto en el ambiente con 30% de HR y condiciones como en el Escenario C, Figura 2 (d), no cumpliría con una VU de 50 años para una cubierta de 25mm.

4. CONCLUSIONES

Las principales consideraciones que se pueden tomar en base a los resultados discutidos en este artículo son:

- Los modelos matemáticos de Possan (2010) y Ekolu (2018) resultan en profundidades de carbonatación más cercanas a las encontradas en las pruebas;
- El modelo de Ho y Lewis (1987) tiende a subestimar la profundidad de carbonatación;
- El modelo de Bob y Affana (1993) tiende a sobreestimar la profundidad de carbonatación;
- Los modelos de Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) mostraron mayor influencia del factor de resistencia a la compresión en las profundidades de carbonatación;
- El factor de concentración de CO_2 de los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018) ejerce la menor influencia sobre las profundidades de carbonatación estimadas para el escenario B en comparación con los demás modelos mencionados;
- El modelo de Bob y Affana (1993) presenta la mayor sensibilidad a la variable HR, mientras el modelo de Ho y Lewis (1987) no posee entrada de datos para esa variable.

Los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) con un concreto de 20 MPa en el escenario A, el modelo de Bob y Affana (1993) con un concreto expuesto al 0,07% de CO_2 en el ambiente en el escenario B y el modelo de Bob y Affana (1993) con un concreto expuesto en un ambiente con el 30%, 50% y el 70% de HR en el escenario C no conseguirían cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas.

Así, se observa que existe variabilidad en los resultados del frente de carbonatación estimados por los modelos seleccionados en comparación con los resultados reales de la carbonatación natural. Y esa variabilidad ocurre en mayor o menor grado dependiendo de los parámetros considerados en las ecuaciones. El análisis de sensibilidad realizado con los tres parámetros evaluados - resistencia a la compresión, concentración de CO_2 y humedad relativa del aire – muestra que esas variables

tienen una influencia significativa en los resultados emitidos por los modelos y, por lo tanto, deben ser consideradas en las ecuaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ubicada en Porto Alegre, Brasil, y a su Programa de Postgrado en Ingeniería Civil: Construcción e Infraestructura (PPGCI) por proporcionar las subvenciones necesarias para el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bob, C., Afana, E. (1993). “On-site assessment of concrete carbonation”. Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Structures, RILEM, Bratislava: (Rep. Eslovaca), pp. 84–87.
- Cadore, W.C. (2008), “Estudo da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p.149.
- Chen, T., Gao, X. (2019), *Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste*. Journal of CO₂ Utilization, 34:74-86. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.034>
- Chen, Y., Liu, L., Yu, Z. (2018), *Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength*. Materials, 11, 2167. <https://doi.org/10.3390/ma11112167>
- Dierfeld, S. G. et al. (2020), *Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC*. Materials and Structures, 53:136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
- Elsalamawy, M., Mohamed, A. R., Kamal, E. M. (2019), *The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete*. Alexandria Engineering Journal 58(4):1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.008>
- Ekolu, S. O. (2018), *Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation*. Cement and Concrete Composites. 86:40-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.006>
- Ferreira, M. B. (2013), “Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, p. 197.
- Félix, E. E., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), *Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*. Revista ALCONPAT, 7(3), pp. 302-316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>
- Helene, P. (1997). “Vida útil das Estruturas de Concreto”. in: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais. Porto Alegre: RS (Brasil).
- Ho, D. W. S., Lewis, R. K. (1987), *Carbonation of concrete and its prediction*. Cement and Concrete Research, 17(3):489-504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
- Housty, Y. F., Wittmann, F. H. (2012), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research, 32(12):1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)
- Köliö, A. et al. (2014), *Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish*

- concrete buildings in changing climate. *Engineering structures*, 62-63:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.032>
- Kulakowski, M. P. (2002), “*Contribuição ao estudo de carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS (Brasil), p. 180.
- Li, D. et al. (2018), *Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures*. *Construction and Building Materials*, 167:73-81 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127>
- Nardino, C. et al. (2019) “*Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural*” in: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Curitiba:PR (Brasil), pp. 300-311. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.052>
- Pauletti, C. (2009). “*Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre:RS (Brasil), p. 285.
- Peter, M. A. et al. (2008), *Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study*. *Cement and concrete research*, 38(12):1385-1393. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.003>
- Pires, P. F. (2016). “*Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. p. 141.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 263.
- Possan, E. et al. (2017), *CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study*. *Case Studies in Construction Materials*, 6:147-161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>
- Ribeiro, D. V. et. al. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, p. 426.
- Ribeiro, A. B., Santos, T., Gonçalves, A. (2018), *Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept*. *Construction and Building Materials*. 175:360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.206>
- Rozière, E., Loukili, A., Cussigh, F. (2009), *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*. *Construction and Building Materials* 23(1):190–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
- Sanjuán, M., Andrade, C., Cheyreyzy, M. (2003), *Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions*. *Advances in Cement Research*, 15(4):171–180. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.4.171>
- Song, H., Kwon, S. (2007), *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. *Cement and Concrete Research*, 37(6):909-915. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.011>
- Tasca, M. (2012), “*Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p. 178.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of Steel in Concrete*”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, p.468.
- Vieira, R. E. et al. (2016). “*Aspectos sobre a extração e composição da água de poro de pasta de cimento hidratado com vista à durabilidade do concreto armado*”. in: 7 Congresso Brasileiro de Cimento - CBCI, São Paulo: SP (Brasil), pp. 15.

Análisis del rendimiento de bloqueadores químicos por gravedad en el tratamiento de la humedad ascendente en muros de mampostería

R. H. Malaquias¹, G. J. Bruschi², D. S. Brisotto^{3*}

*Autor de Contacto: daiane.brisotto@ufsc.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.561>

Recepción: 13/10/2021 | Aceptación: 07/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el desempeño del tratamiento de la humedad ascendente en paredes, mediante el uso de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrófugos disponibles en el mercado brasileño, con su introducción por gravedad. La evaluación de la humedad ascendente se realizó calculando la tasa de absorción de agua en las muestras, combinada con las imágenes obtenidas por la cámara termográfica. De los resultados encontrados se concluyó que el tratamiento no redujo por completo la patología en las paredes, sin embargo, ambos productos obtuvieron un buen desempeño, logrando reducir considerablemente las tasas de absorción de agua.

Palabras clave: humedad ascendente; patología; barreras químicas.

Citar como: Malaquias, R. H., Bruschi, G. J., Brisotto, D. S. (2022), “Análisis del rendimiento de bloqueadores químicos por gravedad en el tratamiento de la humedad ascendente en muros de mampostería”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 61 – 75, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.561>

¹ Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI Campus Erechim, Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Brasil.

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Contribución de cada autor

Todos los autores contribuyeron por igual a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material y la recopilación de datos fueron realizadas por Ronei. El análisis de los datos fue realizado por Ronei (75%) y Giovani Jordi Bruschi (25%). El primer borrador del manuscrito fue escrito por Giovani Jordi Bruschi y todos los autores comentaron versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final. Además, la Dra. Daiane de Senna Brisotto fue la responsable de la supervisión de la investigación.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Performance analysis of gravity chemical blockers in the treatment of rising damp in masonry walls

ABSTRACT

The objective of this work is the performance analysis of the rising damp treatment in walls, through the use of chemical blockers (i.e., crystallizing and water repellent) available in the Brazilian market, with their introduction by gravity. As there are no standardized tests for such a study, experiments conducted by other researchers were used as a reference. The evaluation of the rising damp was achieved by the calculation of the water absorption rate in the specimens, allied with the images obtained by the thermographic camera. From the results, it was concluded that the treatment did not completely reduce the pathological manifestation in the walls, but both products performed well and managed to reduce the water absorption rate considerably.

Keywords: rising damp; pathological manifestation; chemical barrier.

Análise de desempenho de bloqueadores químicos por gravidade no tratamento de umidade ascendente em paredes de alvenaria

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise de desempenho do tratamento da umidade ascensional em paredes, através do uso de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrofugantes disponíveis no mercado brasileiro, com a introdução dos mesmos por gravidade. A avaliação da umidade ascendente deu-se pelo cálculo da taxa de absorção de água nos corpos de prova, aliado com as imagens obtidas pela câmera termográfica. A partir dos resultados encontrados concluiu-se que o tratamento não reduziu por completo a patologia nas paredes, porém ambos os produtos obtiveram um bom desempenho, conseguindo reduzir consideravelmente as taxas de absorção de água.

Palavras-chave: umidade ascensional; patologia; barreira química.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de humedad en los edificios es recurrente y puede generar graves manifestaciones patológicas para el sistema constructivo. Los materiales de construcción porosos (por ejemplo, ladrillos y hormigón) facilitan el transporte de gases y líquidos presentes en el medio y, en combinación con otros factores ambientales, pueden provocar ataques biológicos, cristalización de sales, ataques químicos, daños por congelación, etc. (Sandrolini y Franzoni 2006; Bertolini, 2010). El desarrollo de estas patologías puede ocurrir por mala ejecución o falta de sistema de impermeabilización, provocando impacto estético y degradación de estructuras y revestimientos. Además, en los casos más graves, problemas asociados a la salud humana (Franzoni, 2018).

Como resultado de la complejidad de su tratamiento, uno de los tipos más desafiantes de manifestación de la humedad es la humedad ascendente. Reconocido mundialmente, este fenómeno se manifiesta cuando el agua subterránea fluye hacia la base de un edificio y asciende por los poros de la estructura por acción capilar (Massari y Massari, 1993; Alfano, 2005; Henriques, 2007). Aunque ocurre con cierta frecuencia, corresponde a un fenómeno complejo con gran imprevisibilidad conductual (Torres, 2014; Guimarães et al., 2016).

Se han propuesto varias técnicas de reparación para resolver este problema. Las principales se pueden subdividir en cuatro grandes grupos según su función (Henriques, 1994): (i) soluciones para evitar el acceso al agua desde el suelo; (ii) soluciones para eliminar el exceso de agua; (iii) soluciones para prevenir la acumulación de agua; y (iv) soluciones para ocultar anomalías. Cuando están bien adaptadas y ejecutadas, las soluciones para prevenir el acceso al agua del suelo son la técnica de reparación más eficiente para tratar el aumento de humedad. Esta solución se puede realizar reduciendo la sección absorbente, aumentando la ventilación de la base o mediante barreras físicas y químicas. Aunque el sistema no actúa como origen del fenómeno de ascenso capilar, evita que el agua alcance alturas capilares excesivas (Torres, 2013; Freitas et al., 2008).

Actualmente, la implementación de barreras químicas es uno de los métodos más utilizados para gestionar y solucionar el fenómeno de la humedad creciente. Esta técnica consiste en perforar agujeros en la pared a lo largo de un perfil horizontal, generalmente espaciados de 10 a 15 cm, lo más cerca posible del suelo en uno o ambos lados de la mampostería, dependiendo principalmente del grosor de la pared (Dreyer y Hecht, 2001; Alfano et al., 2006; Lubelli et al., 2013). Los aditivos químicos introducidos en los orificios pueden actuar llenando los poros (creando una capa impermeable en la mampostería) y/o haciendo que los poros sean repelentes al agua (inhibiendo el transporte capilar). Entre las sustancias de relleno de poros, también conocidas como cristalizadores o recubridores de poros, destacan las acrilamidas, resinas epoxi, silicatos alcalinos y silicatos inorgánicos. En cuanto a los productos hidrófugos, los tipos más extendidos son los organometálicos, siliconas y siloxanos. Estos productos pueden tener un solvente orgánico o ser soluciones o emulsiones acuosas en agua, encontrándose con diferentes viscosidades (líquido, crema y gel) (Lubelli et al., 2013; Socoloski y Masuero, 2019).

Uno de los principales problemas asociados a la aplicación de barreras químicas es la dificultad para introducir el producto en los poros, ya que estos suelen estar llenos de agua. Para ser eficaz, el producto químico debe interactuar con todos los poros y huecos, creando una capa horizontal hidrófoba o impermeable que impida el acceso al agua. Si la barrera horizontal no es continua, el agua aún puede fluir y la humedad ascendente no se detendrá. Por lo tanto, la introducción del producto, aplicado con presión / inyección o alimentación por gravedad / impregnación, debe realizarse con miras a estratificar las áreas tratadas (Hees et al., 2018).

La aplicación de barreras químicas por gravedad (Figura 1 (a)) se basa en la fuerza de gravedad y capilaridad de los materiales y se puede realizar insertando los químicos sin aparatos complejos (Torres, 2014). Según la mayoría de los fabricantes brasileños, la perforación debe realizarse con una inclinación de 45 ° y los orificios deben estar saturados antes de insertar los productos,

promoviendo una mejora en la dispersión y, en consecuencia, en todo el proceso (Socoloski, 2015). La aplicación de productos químicos debe ser integral y continua, cubriendo toda el área tratada. El comportamiento no intrusivo unido a la versatilidad de esta técnica da como resultado el reconocimiento mundial de su uso en edificios históricos. Sin embargo, para demostrar su eficacia, pueden ser necesarios algunos años (Carrió, 1997). En la aplicación de inyección, como se muestra en la Figura 1 (b), el fluido se bombea a la pared a presión, a través de una bomba de inyección con boquillas especiales que evitan la retracción de los productos. Se pueden acoplar varios juegos de boquillas simultáneamente a la bomba de inyección o la inyección se puede realizar de forma independiente (Luso, 2002). La presión de inyección no es necesariamente constante y puede variar de un aplicador a otro, pero no debe superar los 0,4 MPa. Este rango evita una posible degradación de los materiales que componen los muros tratados (Henriques, 1994).

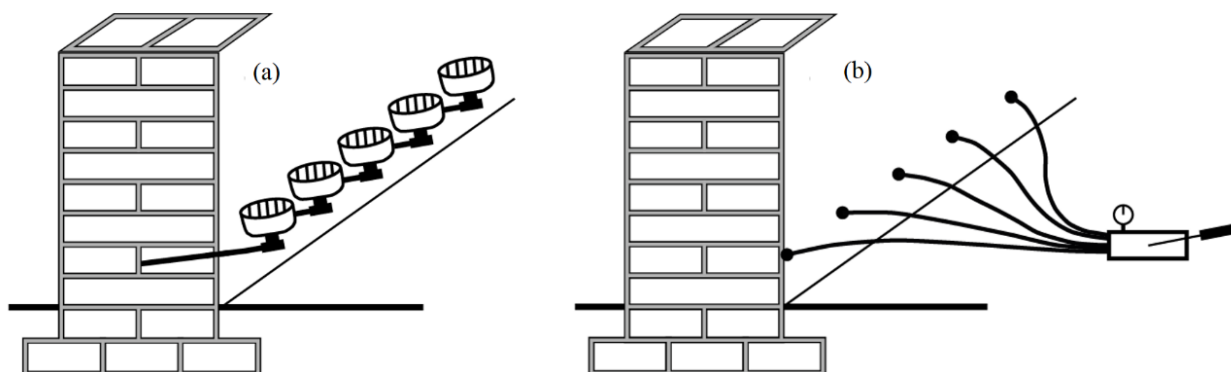


Figura 1. Introducción de barreras químicas: (a) gravedad (b) inyección. Adaptado de Henriques (1994).

El uso de barreras químicas, ya sea por inyección o por gravedad, ha sido ampliamente investigado (Alfano et al., 2006; Freitas, 2014; Franzoni, 2014; Franzoni, 2018; Socoloski et al., 2019). La investigación se llevó a cabo en el laboratorio, sobre materiales de construcción simples (Vanhellemon et al., 2008), conjuntos de materiales (Hacquebord et al., 2013) e in-situ (Larsen, 2012). Aunque es difícil comparar los resultados de diferentes encuestas, considerando que los métodos experimentales generalmente no son convergentes, los estudios disponibles brindan una indicación valiosa de la capacidad de dispersión y eficiencia de secado de los productos químicos (Franzoni et al., 2016). La capacidad de dispersión debe verse como un factor clave en la creación de barreras químicas funcionales y estables, ya que un comportamiento no estacionario puede permitir el flujo capilar (Hacquebord et al., 2013). Esta capacidad depende de la naturaleza del disolvente y de su miscibilidad con el agua, así como de la viscosidad de los productos químicos. Estos factores son esenciales para el desplazamiento del agua de los poros (l'Anson y Hoff, 1988). A pesar de la existencia de varios métodos y productos para solucionar el problema de la humedad ascendente, la investigación científica sobre su eficacia, tanto en el laboratorio como en el campo, sigue siendo escasa. Además de no ser tan efectivas como se esperaba, las soluciones de tratamiento pueden agravar las manifestaciones patológicas si la toma de decisiones es inadecuada. Así, existe una gran demanda de resultados experimentales que aporten evidencias sobre el funcionamiento, efectividad y limitaciones de estos sistemas de reparación, permitiendo una mejor comprensión de su comportamiento y, en consecuencia, una mayor tasa de éxito cuando se aplica a mampostería real.

En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo estudiar experimentalmente el tratamiento de la humedad ascendente en paredes mediante barreras químicas por gravedad, mediante productos bloqueantes con diferentes bases químicas. Por tanto, se analizaron comparativamente

un producto de cristalización (silicato activo) y un producto repelente de agua (silanosiloxanos oligoméricos).

2. MATERIALES

En este estudio se construyeron seis pequeños muros con ladrillos cerámicos macizos y mortero industrializado multipropósito. Las muestras se sometieron al procedimiento de tratamiento de humedad de ascensión con dos productos bloqueantes con diferentes bases químicas.

2.1 Ladrillo cerámico

Se adoptaron bloques de cerámica maciza de 190x90x50 mm (con una tolerancia de hasta 3 mm de dimensiones). Como no existe una norma técnica para probar la absorción de agua en ladrillos sólidos, se aplicó en su lugar la NBR 15270 (ABNT, 2005). Se prepararon seis muestras siguiendo cinco pasos: (i) eliminación de partículas sueltas y polvo; (ii) proceso de secado a 105 ° C durante 24 horas; (iii) pesaje para determinar el parámetro de masa seca (d_m); (iv) inmersión de cada muestra en agua durante 24 horas (a temperatura ambiente); y (v) nuevo pesaje para determinar el parámetro de masa húmeda (w_m). La tasa de absorción de agua de los ladrillos (WA) se determina según (1) y los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 1.

$$WA(\%) = \frac{w_m - d_m}{d_m} \times 100 \quad (1)$$

Tabla 1. Tasa de absorción de agua de bloques de cerámica.

Propiedad	Muestra						Promedio (%)
	1	2	3	4	5	6	
Peso seco (g)	1605,48	1597,80	1587,41	1622,99	1586,27	1682,45	25,48
Peso húmedo (g)	1994,56	2021,41	2017,26	2043,88	2012,05	2057,58	
WA (%)	24,23	26,51	27,08	25,93	26,84	23,30	

2.2 Mortero industrializado

Para la colocación de los ladrillos se utilizó un mortero industrializado polivalente. Se eligió el mortero multiusos industrializado por el mejor control de calidad del producto, evitando posibles variaciones en los resultados. Este producto está compuesto por cemento Portland, agregados minerales y aditivos químicos, con una resistencia a la compresión de 1.2 MPa y una relación agua / materia seca de 0.2. El mortero se preparó con una mezcla de agua hasta alcanzar los parámetros adecuados de consistencia y homogeneidad. La consistencia mínima (20 ± 5 cm) se determinó siguiendo NBR 13276 (ABNT, 2005). Para la ejecución de la base de los muros se utilizó un mortero con una resistencia de 8 MPa.

2.3 Bloqueadores químicos

Inicialmente, se realizó una investigación sobre los agentes impermeabilizantes disponibles para el tratamiento de la humedad ascendente en la industria brasileña. Solo se eligió un producto de cada base química (un cristalizador y un repelente de agua) para la investigación, debido a la baja disponibilidad de repelentes de agua para este tipo de tratamiento. El producto de cristalización, denominado producto A (65% de contenido activo), estaba disponible comercialmente en envases

de 1 litro y 25 litros. El repelente de agua, denominado producto B (9% de contenido activo), solo se ofrecía en envases de 18 litros. La caracterización de los bloqueadores químicos, proporcionada por los fabricantes, se presenta en la Tabla 2. El producto cristalizante se caracterizó según su pH y contenido de sólidos, mientras que el bloqueador químico hidrófugo se caracterizó según su pH y masa específica.

Tabla 2. Caracterización de bloqueadores químicos

Producto	pH	Contenido de activos	Masa específica	Información
Cristalizante (A)	11	65%	-	Silicato activo
Hidrófugo (B)	6,5 a 8	9%	1 kg/m ³	Silanosiloxanos oligoméricos

3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Ejecución de muestras

Para simular un muro real, se moldearon mini muros (50x50x9cm) según la metodología presentada por Socolski (2015), que se basó en los modelos de Rirsch y Zhang (2010) y Freitas et al. (2008). Las dimensiones adoptadas fueron las más grandes posibles teniendo en cuenta que debían ser transportadas por dos personas, sin sobrepasar el límite de hasta 50 kg. Se prepararon seis probetas, dos para la aplicación del producto cristalizante (PA1 y PA2), dos para el producto hidrofóbico (PB1 y PB2) y dos como referencia (T1 y T2) sin ningún tratamiento químico.

La base de los muros construidos tenía una altura aproximada de 50 milímetros, realizada en mortero armado, con una malla cuadrada galvanizada de 250 milímetros para evitar roturas por cizallamiento. Se insertaron barras de acero en la base del mortero, sirviendo como ganchos para manipular las muestras, como se representa en la Figura 2 (a). Después del proceso de curado de 21 días, los muros se construyeron sobre los cimientos. Las muestras estaban compuestas por 2.5 ladrillos por fila, en total 8 filas, con juntas verticales intercaladas como en mampostería real, como se muestra en la Figura 2 (b). La pared está en contacto con la humedad del suelo a través de los cimientos, hechos de materiales cementosos.



Figura 2. (a) Base de pared (b) Pared terminada

3.2 Efectividad de los bloqueadores químicos

3.2.1 Tasa de absorción de agua

Esta prueba proporcionó el parámetro principal en el análisis del rendimiento del tratamiento contra el aumento de humedad. Los procedimientos se basaron en la investigación desarrollada por

Socoloski (2015), según las siguientes fases:

- a) Medición de la masa de todas las muestras (masa seca antes del tratamiento), 21 días después de su ejecución;
- b) Saturación de las bases de mortero (Figura 3);

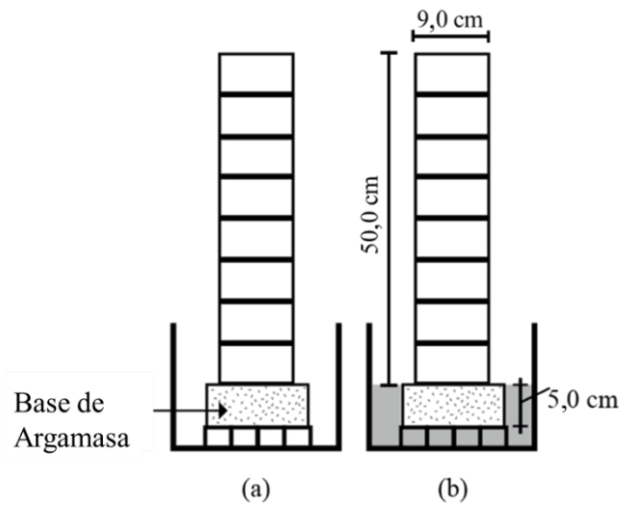


Figura 3. Saturación de la base: (a) pared seca; (b) base en contacto con el agua. Adaptado de Socoloski (2015).

- c) Verificación de la estabilización de la masa de los muros, que tuvo lugar entre los días 7 y 8, indicando la estabilización de la absorción de agua. Medición de la masa de la pared el día 8 (masa húmeda antes del tratamiento);
- d) Cálculo de la tasa de absorción de agua antes del tratamiento, con los valores de masa obtenidos antes y después de la saturación de bases;
- e) Tratamiento de las paredes con bloqueadores químicos, insertado a 45 °, con orificios de 100 mm de altura y espaciamiento de 100 mm cada uno, con un total de 5 orificios por pared. Para garantizar la estanqueidad del esquema, el producto se insertó con un sistema de viales, permitiendo controlar la velocidad y el volumen de inyección (Figura 4);



Figura 4. Aplicación de bloqueadores químicos.

f) Nueva saturación de base (50 mm de profundidad de agua) durante 28 días. Durante este período, la masa se midió a los 7, 14 y 28 días, respectivamente.

g) Después de 28 días, las muestras se sacaron del agua y se colocaron a temperatura ambiente hasta que la masa se estabilizó, lo que ocurrió en 20 días. Medición de masa el día 20 (masa seca después del tratamiento);

h) Se repitió el proceso de saturación de bases, con las paredes tratadas, para cuantificar la acción preventiva. Después de 8 días, se tomó una nueva medición de masa (masa húmeda después del tratamiento) para calcular la tasa de absorción de agua después del tratamiento.

La tasa de absorción de agua se calculó por la diferencia entre la masa seca y húmeda, dividida por el área de contacto de los muros y el mortero base, de acuerdo con la Ecuación 2.

$$\text{Tasa de absorción (kg/m}^2\text{)} = \frac{w_m - d_m}{A} \quad (2)$$

Donde "wm" representa la masa húmeda de la pared, "dm" la masa seca y "A" el área de contacto de los bloques en la primera fila con la humedad.

3.2.2 Termografía

La prueba de termografía, considerada cualitativa o complementaria, permite el mapeo de una región, distinguiendo zonas de diferentes temperaturas. Por lo tanto, esta prueba se utilizó para monitorear la distribución de humedad en las muestras.

Se utilizó una cámara termográfica FLIR T440 y, durante la captura de imagen, se fijaron algunos parámetros del equipo, como la emisividad (0,81) y la distancia entre la muestra y la cámara (2 m), apuntando a una mejor resolución. La temperatura atmosférica medida por la cámara, en el momento del experimento, era de 23 ° C. Además, para mejorar el rendimiento del equipo, se montó e instaló un fondo oscuro detrás de las muestras, aumentando la nitidez de las imágenes.

Con el software PSPP2018, se determinaron las temperaturas máximas y mínimas de la pared durante todo el período de prueba. Las escalas de color adoptadas fueron las mismas para todas las imágenes para permitir la comparación visual. Es importante destacar que en esta prueba la cámara solo proporciona el registro del parámetro de temperatura, sin incluir la tasa de humedad ni ninguna otra información. Así, si bien las imágenes contribuyen al diagnóstico, no son necesariamente determinantes en el análisis.

3.2.3 Análisis de costos

Para evaluar el costo de realizar este tipo de tratamiento se investigó el valor de cada producto y se midió su consumo considerando el espesor (90 mm) y la longitud (1 m) de las paredes ensayadas. Por lo tanto, fue posible estimar cuál de los bloqueadores químicos tenía la mejor relación costo-beneficio (es decir, el costo más bajo por metro lineal de pared tratada).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tasa de absorción de agua

Se registró la masa de cada muestra ensayada para calcular la tasa de absorción antes y después del tratamiento químico. Los resultados se muestran en la Tabla 3 y la Figura 5.

Tabla 3. Tasa de absorción antes y después del tratamiento

Muestra	Área de contacto (m ²)	Antes del tratamiento				Después del tratamiento				Reducción (%)
		Masa seca - 21 curado después de la cocción (kg)	Masa húmeda - 8 días de contacto con agua (kg)	Tasa de absorción (kg/m ²)		Masa seca - 21 curado después de la cocción (kg)	Masa húmeda - 8 días de contacto con agua (kg)	Tasa de absorción (kg/m ²)		
				Por muestra	Promedio			Por muestra	Promedio	
T1	0,045	52,68	54,60	42,24	45,87	52,50	54,40	41,80	44,55	2,88
T2	0,045	51,65	53,90	49,50		51,60	53,75	47,30		
PA1	0,045	49,50	50,95	56,11	49,51	49,00	49,90	19,80	20,35	58,90
PA2	0,045	50,60	52,50	42,90		50,55	51,50	20,90		
PB1	0,045	47,90	50,45	31,90	36,85	47,60	48,25	14,30	11,00	70,15
PB2	0,045	48,50	50,45	41,80		48,20	48,55	7,0		

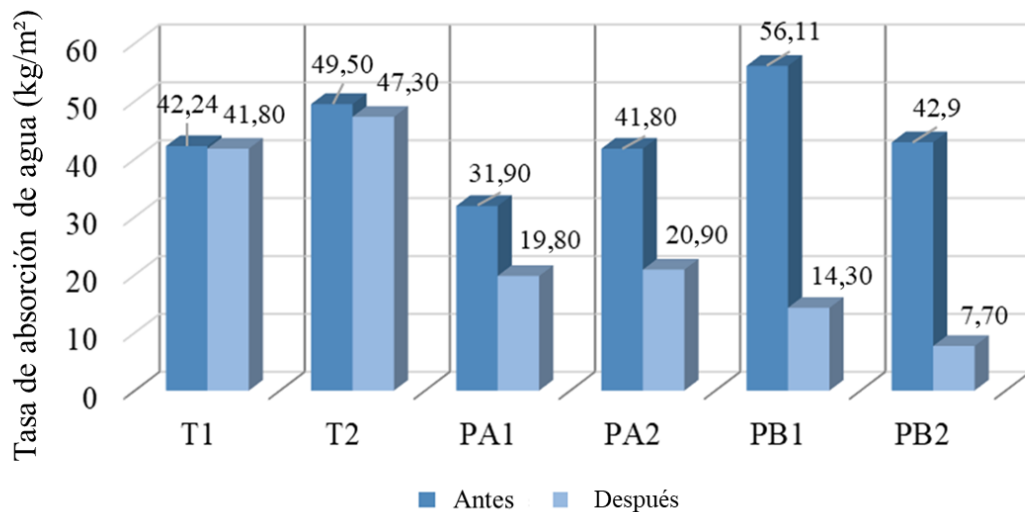


Figura 5. Tasa de absorción de agua

Los valores de la Tabla 3 demuestran que antes de que comenzara el tratamiento, hubo un aumento en la masa de las muestras cuando se expusieron a la humedad. Sin embargo, según la Figura 5, los resultados muestran que ambos productos pudieron reducir considerablemente las tasas de absorción de las muestras tratadas. La aplicación del producto cristalizante resultó en una reducción promedio del 58,9% en la tasa de absorción de agua, mientras que para el producto hidrófobo esta reducción fue del 70,15%. El hecho de que las paredes de control muestren una pequeña disminución de masa y, en consecuencia, una disminución de la tasa de absorción (2,88%), ya era de esperar debido al proceso de equivalencia mostrado entre la tasa de evaporación y absorción y, dado que esta investigación analizó una reducción -tamaño de la muestra, el proceso se produjo

más rápido de lo normal en comparación con una construcción de tamaño completo.

Tabla 4. Masa de muestras durante el tratamiento

Muestra	Masa durante el tratamiento (kg)		
	7 días	14 días	28 días
T1	-	-	54,25
T2	-	-	53,55
PA1	50,85	50,20	49,80
PA2	52,30	51,65	51,35
PB1	49,75	48,95	48,45
PB2	50,30	49,65	49,20

Las medidas de masa durante el tratamiento (7, 14 y 28 días después de la aplicación de los bloqueadores) se muestran en la Tabla 4. Los resultados son equivalentes a los obtenidos por Socoloski (2015) para los dos tipos de bloqueadores químicos, con los valores más bajos de masa obtenida en 28 días de saturación. Esto se puede explicar por el hecho de que, con el tiempo, la tasa de evaporación supera la tasa de absorción (esta tasa disminuye a medida que los poros cristalizan o con un comportamiento repelente al agua debido a la acción química). Además, la reducción de masa fue claramente superior con el producto hidrófobo. Estos resultados se pueden ver en la Figura 6.

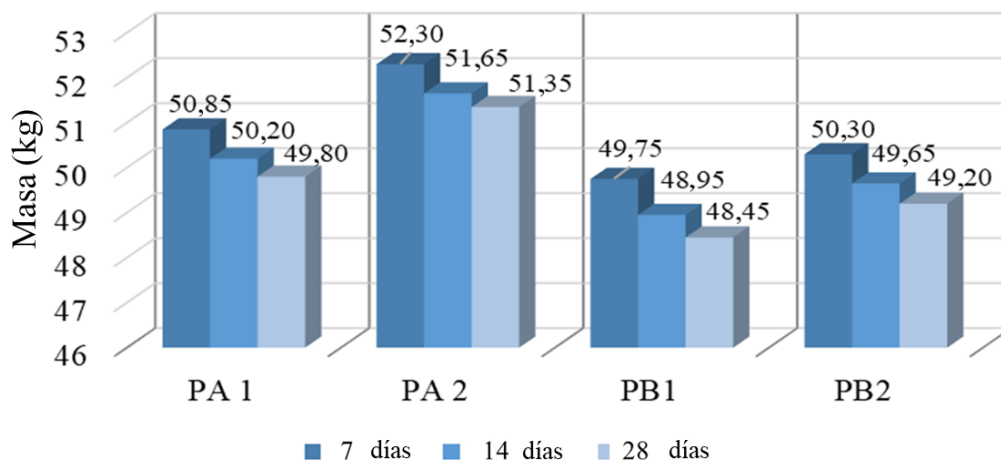


Figura 6. Comparación entre masas durante el tratamiento

Tras la evaluación del rendimiento de los productos, para la prevención del fenómeno de la humedad ascendente, la Figura 7 muestra una comparación entre la masa húmeda antes y después del tratamiento. Si bien la prevención no es el foco principal del método evaluado, los resultados demuestran el potencial de utilizar los productos como recurso preventivo en la construcción.

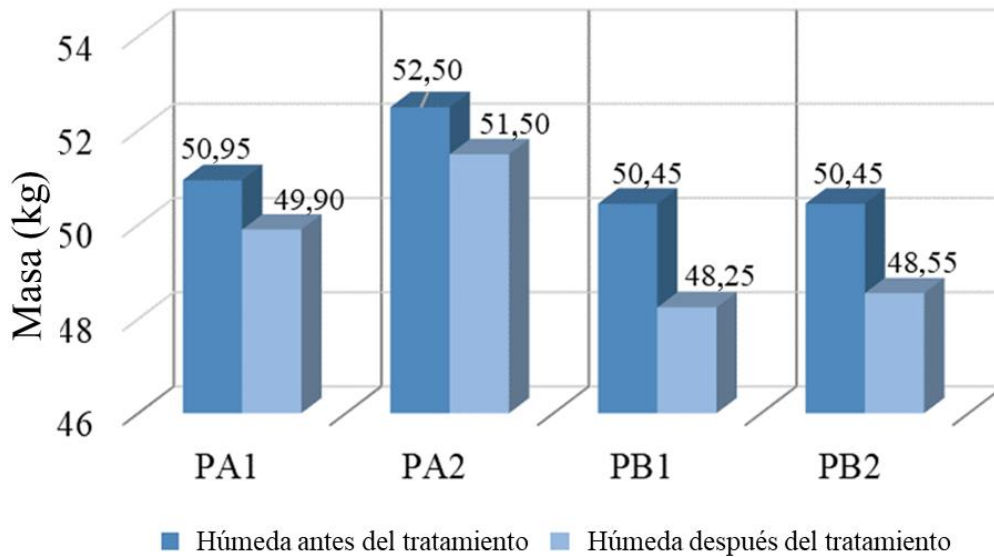


Figura 7. Comparación entre masas húmedas antes y después del tratamiento

Para confirmar si las reducciones en la tasa de absorción fueron significativas, los resultados se trataron estadísticamente y se analizaron mediante el método de varianza (ANOVA). El resultado se muestra en la Tabla 5 y clasifica la diferencia como significativa.

Tabla 5. Análisis de varianza

Propiedad		Suma cuadrada	Grados de libertad	Media cuadrática	Prueba de Fisher	Significativo
Absorción	Entre grupos	1199,11	2	599,55	47,95	Si
	Dentro grupos	37,51	3	12,50	-	-
	Total	1236,62	5	-	-	-

Para verificar las diferencias de los grupos, se realizó la prueba de Fischer. Se observó que, estadísticamente, no hubo diferencia significativa entre los resultados comparando los productos cristalizantes y repelentes de agua. Sin embargo, en comparación con las muestras no tratadas (grupo de control), hubo una reducción significativa en la tasa de absorción promedio, lo que indica la efectividad del tratamiento (Figura 8).

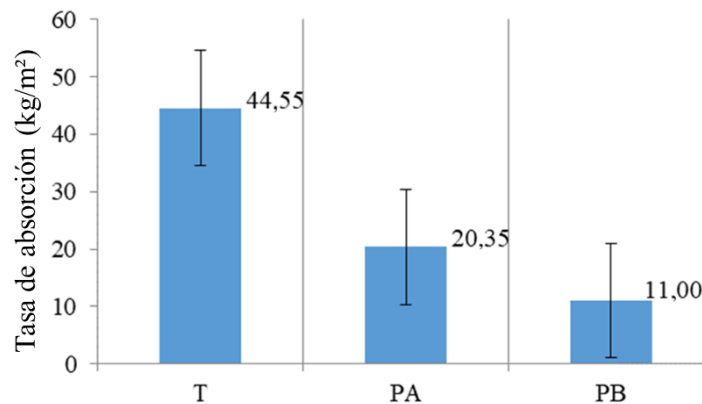


Figura 8. Comparación de la tasa de absorción media después del tratamiento

4.2 Termografía

Las imágenes obtenidas por la prueba de termografía, Figuras 9 a 12, demuestran cualitativamente la temperatura de las muestras antes del tratamiento y a los 28 días de tratamiento. Las áreas con colores más claros, tonos de naranja, representan temperaturas más altas (es decir, regiones más secas).

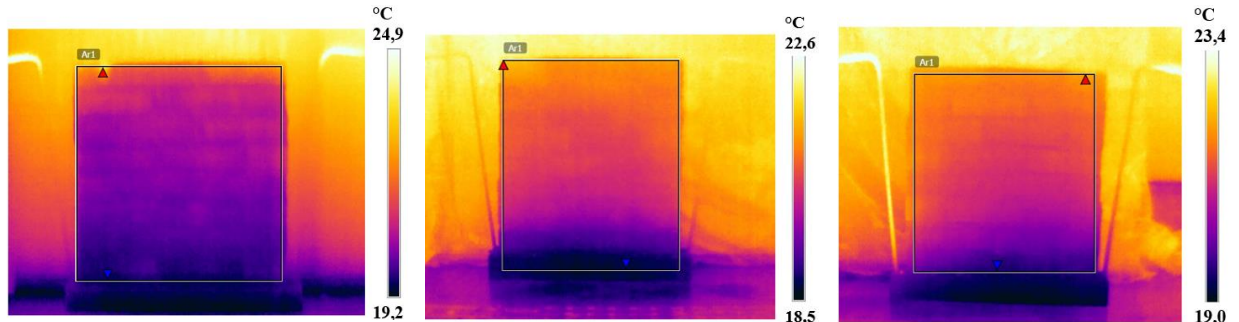


Figura 9. Muestra PA1: a) pared seca; b) pared mojada; c) pared a los 28 días

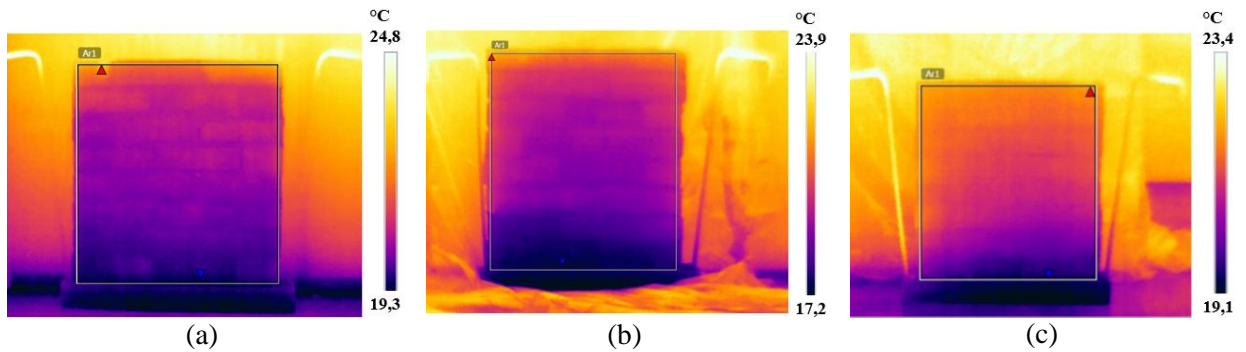


Figura 10. Muestra PA2: a) pared seca; b) pared mojada; c) pared a los 28 días

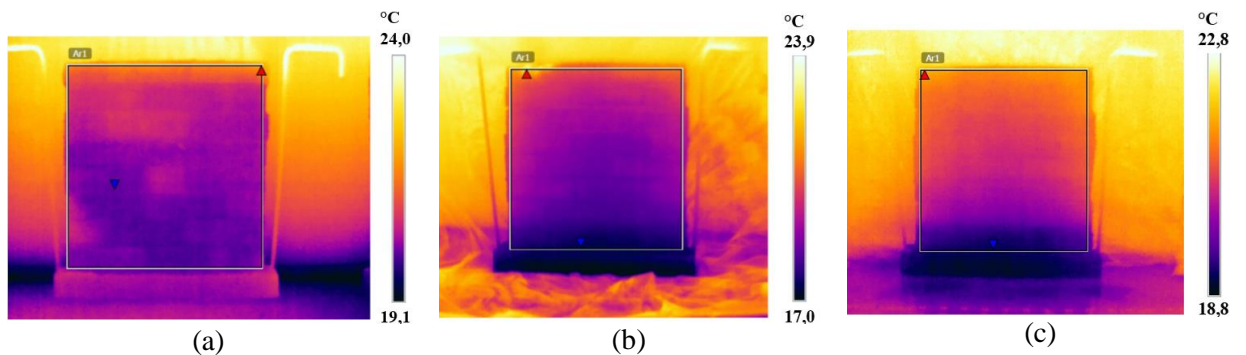


Figura 11. Muestra PB1: a) pared seca; b) pared mojada; c) pared a los 28 días

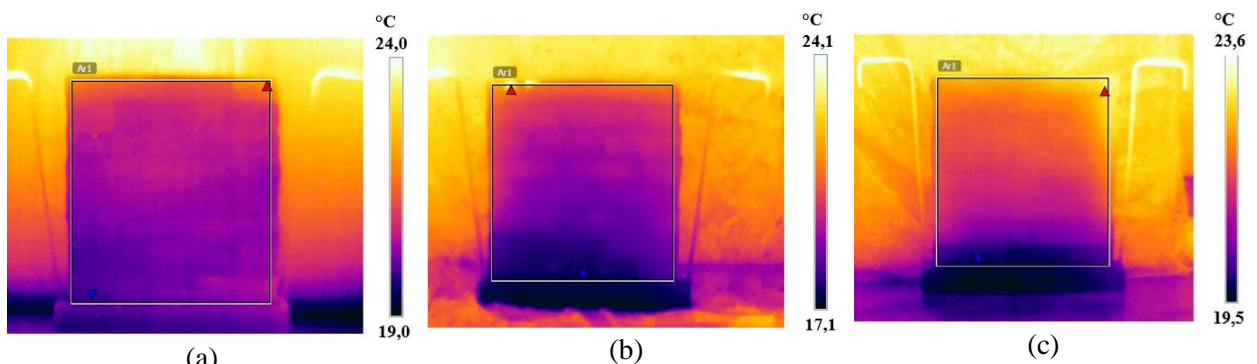


Figura 12. Muestra PB2: a) pared seca; b) pared mojada; c) pared a los 28 días

En general, las imágenes muestran inicialmente que, antes del tratamiento y con la pared seca, había humedad distribuida por toda la pared, excepto en la parte superior y en los bordes, debido al mayor contacto con el aire en estos lugares. Tras la saturación de las bases, las paredes muestran una marcada banda azul oscuro, cercana a la base, que caracteriza la presencia de humedad ascendente. A los 28 días de tratamiento se observó una reducción del rango de humedad, lo que indica un resultado favorable para los productos aplicados.

4.3 Análisis de costos

Al analizar el comportamiento de los productos, ambos fueron absorbidos por las paredes en un período de aproximadamente 1 día, con un consumo por agujero de 125 ml para el producto A (cristalización) y 60 ml para el producto B (repelente al agua). Si bien la reducción en la tasa de absorción de agua provocada por los dos productos no mostró ninguna diferencia estadística, el repelente al agua mostró la mejor relación costo-beneficio, alcanzando casi 1/5 del valor del producto cristalizante, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de costos

Parámetro	Producto		
	A (Cristalizador)	B (Hidrófugo)	
Volumen del paquete (L)	1,00	25,00	18,00
Precio (R\$)	36,50	595,00	189,00
Consumo (l/m)	1,25	1,25	0,60
Costo (R\$/m)	45,63	29,75	6,30

El costo por metro lineal del repelente de agua fue de R\$ 6,30, mientras que el cristalizador alcanzó R\$ 29,75, lo que representa un aumento de más de 4 veces.

5. CONCLUSIONES

- Se encontró que ambos productos presentaban una reducción significativa en las tasas medias de absorción de agua de las probetas.
- El producto de cristalización generó una reducción promedio, en comparación con las paredes no tratadas, de 32% en la tasa de absorción de agua, mientras que el producto repelente de agua de 28,18%. Sin embargo, estadísticamente, esta diferencia no fue significativa, lo que indica que ambos tienen el mismo desempeño.
- En relación al costo-beneficio (factor decisivo en la elección del bloqueador), se concluyó que el hidrofóbico tenía ventaja sobre el cristalizador, con un costo unas 5 veces menor.
- Si bien el sistema de inyección utilizado en esta investigación fue diseñado para prevenir fugas y controlar la velocidad de aplicación, la inyección se obstruyó ocasionalmente durante la aplicación del producto en cristalización, mostrando la necesidad de estudiar la velocidad de inyección ideal. La realización de esta técnica fuera del entorno del laboratorio probablemente crearía problemas ergonómicos debido a su complejidad en el alcance del equipo. La necesidad de estudios sobre métodos de aplicación de nuevos productos es fundamental para crear un sistema in situ más práctico.
- Por último, cabe señalar que la aparición de la humedad ascendente no es una patología simple y la búsqueda de conocimientos y nuevas técnicas que puedan mejorar el rendimiento de los edificios y reducir los costes de tratamiento es de gran importancia.

6. REFERENCIAS

- Alfano, G., Chiancarella, C., Cirillo, E., Fato, I. F. (2006), *Long-term performance of chemical damp-proof courses: twelve years of laboratory testing*. Building and Environment. 41:1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.017>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15270: Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010), “*Materiali da costruzione: degrado, prevenzione, diagnose, restauro*”, Editore CittàStudi; 2ª ed., Sondrio/Italy.
- Carrió, J. M. (1997), “*Patología de Cerramientos y Acabados Arquitectónicos*”, Munilla-Leria; 2ª ed., Madrid/Spain.
- Dreyer, J., Hecht, C. (2001), *Injection methods for retrofitting of moisture damaged constructions*. Transactions on the Built Environment. 55: 517-526.
- Franzoni, E. (2018), *State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry*. Journal of Cultural Heritage. 31: S3-S9. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001>
- Franzoni, E. (2014), *Rising damp removal from historical masonries: a still open challenge*. Construction and Building Materials. 54: 123-136.
- Franzoni, E., Rirsch, E., Paselli, Y. (2016). “*Laboratory models for the assessment of the effectiveness of chemical damp-proofing in masonry: existing methods and some proposals for new fixtures*”, in: International RILEM Conference Materials, Paris.
- Freitas, R. J. G. (2014), “*Técnicas de tratamento/controle da humidade ascensional – Catálogo*”, Masters Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Freitas, V.P.; Torres, M.I.M.; Guimarães, A. S. (2008), “*Humidade Ascensional*”, FEUP edições; 1.ª ed., Porto/Portugal.
- Guimarães, A. S., Delgado, M. P. Q., De Freitas, V. P. (2016), *Treatment of rising damp in historic buildings: experimental campaign of wall base ventilation and interface effect analysis*. Cultural Heritage. 20: 733-738. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.012>
- Hacquebord, A., Lubelli, B., Lubelli, R., Nijland, T. (2013), *Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations*. Procedia Chemistry. 8: 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2013.03.019>
- Hess, R. P. J., Lubelli, B. H. A. (2018), *New test methods to verify the performance of chemical injections to deal with rising damp*. Journal of Cultural Heritage. 31: S52-S59.
- Henriques, F. M. A. (1994), “*Humidade em Paredes*”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Henriques, F. M. A. (2007), “*Humidade em Paredes*”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- I'anson, S. J., Hoff, W. D. (1988), *Chemical injection remedial treatments for rising damp–I. The interaction of damp-proofing fluids with porous building materials*. Building and Environment. 23: 171-178. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90001-7)
- Larsen, P. L. (2012), *Determination of water content in brick masonry walls using a dielectric probe*. Journal of Architectural Conservation. 18, 47-62. <https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785103>
- Lubelli, B., Van Hees, R. P. J., Hacquebord, A. (2013), *Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees*. Construction and Building Materials. 40: 891-898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.062>

- Luso, E. (2002), “*Contribuição para intervenções no Centro Histórico de Bragança*”. Masters Thesis, Universidade de Minho, Minho.
- Massari G., Massari I. (1993), *Damp Buildings, Old and New*. ICCROM, 17: 2-30.
- Rirsch, E., Zhang, Z. (2010), *Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties*. Construction and Building Materials. 24: 1815-1820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024>
- Sandrolini, F., Franzoni, E. (2016), *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment. 41: 1372-1380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.023>
- Socoloski, R. F. (2015), “*Tratamento de umidade ascensional em paredes através de barreiras químicas por gravidade*”, Masters Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Socoloski, R. F., Masuero, A. B. (2019), *Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity*. Construction and Building Materials. 210: 660-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.018>
- Torres, I. M. (2013), *Wall base ventilation system to treat rising damp: the influence of the size of the channels*. Journal of Cultural Heritage. 15: 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.03.005>
- Torres, R. J. de M. M. (2014), “*Humidades ascensionais em paredes de alvenaria de edifícios antigos*”, Masters Thesis, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 2014.

Influencia del porcentaje de vacíos del concreto celular en la corrosión del acero de refuerzo

C. F. G. Nascimento^{1*} , A. A. Demétrio Filho² , T. M. Silva³ , I. A. R. Teixeira² ,
D. C. M. Neves² , E. C. B. Monteiro^{1,2} 

*Autor de Contacto: carlosfernando.gn@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.507>

Recepción: 06/09/2020 | Aceptación: 09/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comprender si los vacíos intensifican el desencadenamiento de la corrosión de la armadura en el hormigón celular, utilizando losas con masas específicas ligeras. La metodología se basó en cuatro pruebas: inspección visual, potencial de corrosión, resistividad eléctrica y pérdida de masa. En relación con la familia L1, las familias L2 y L3 (mayor contenido de aire) se mostraron más susceptibles a la corrosión de las armaduras, así como en la cantidad de masa perdida de las barras de acero en el 90% de los casos. Sin embargo, el comportamiento de algunas losas indica que existe la posibilidad de que el proceso sea asintomático en cuanto a la mancha, considerando que se verificó la influencia de la cubierta en el proceso de corrosión de las barras de acero.

Palabras clave: porcentaje de vacíos; hormigón ligero; corrosión del refuerzo.

Citar como: Nascimento, C. F. G., Demétrio Filho, A. A., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Neves, D. C. M., Monteiro, E. C. B. (2022), "Influencia del porcentaje de vacíos del concreto celular en la corrosión del acero de refuerzo", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 76 – 97, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.507>

¹ Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, Brasil.

² Laboratório Avançado de Materiais de Construção Civil, Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil.

³ Departamento de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor A. A. Demétrio Filho, contribuyó con la idea original y para la concepción del estudio. El autor E. C. B. Monteiro, se encargó de la supervisión y las directrices para la redacción del trabajo. El autor I. A. R. Teixeira, contribuyó con el 60% y el autor D. C. M. Neves con el 40% de la recogida de datos. El autor C. F. G. Nascimento se encargó de compactar los resultados, las discusiones y los análisis de laboratorio. Finalmente, el autor T. M. Silva contribuyó con el cierre y las conclusiones del artículo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Influence of the void ratio of cellular concrete on the corrosion of steel reinforcement

ABSTRACT

The objective of this study was to understand whether voids intensify the triggering of reinforcement corrosion in cellular concrete, for slabs with light specific masses. The methodology was based on four tests: visual inspection, corrosion potential, electrical resistivity, and mass loss. In relation to the L1 family, the L2 and L3 families (higher air content) were shown to be more susceptible to reinforcement corrosion and mass loss from the steel bars in 90% of cases. However, the behavior of some slabs indicates the possibility of the process being asymptomatic with regard to staining, considering that the influence of the cover on the corrosion of the steel bars was verified.

Keywords: void ratio; lightweight concrete; reinforcement corrosion.

Influência do índice de vazios do concreto celular na corrosão das barras de aço

RESUMO

O objetivo deste estudo foi compreender se os vazios intensificam o desencadeamento da corrosão de armaduras no concreto celular, utilizando placas com massas específicas leves. A metodologia foi baseada em quatro testes: inspeção visual, potencial de corrosão, resistividade elétrica e perda de massa. Em relação à família L1, as famílias L2 e L3 (maior teor de ar) mostraram ser mais suscetíveis à corrosão de armaduras, bem como na quantidade de massa perdida das barras de aço, em 90% dos casos. Entretanto, o comportamento de algumas placas indica que existe a possibilidade de o processo ser assintomático em relação ao manchamento, considerando que a influência do cobrimento foi verificada no processo de corrosão das barras de aço.

Palavras-chave: índice de vazios; concreto leve; corrosão das armaduras.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es uno de los materiales más utilizados y difundidos en el mundo por sus propiedades físicas y mecánicas, lo que incluye cuestiones de durabilidad. Factores como estos estimulan el interés por descubrir nuevas tecnologías y nuevos compuestos como propuesta para mejorar algunas características o aplicabilidad (Mechtcherine et al., 2020; Nguyen; Castel, 2020; Kanellopoulos et al., 2020).

Con el crecimiento tecnológico, en cuanto al uso del material, fue posible producir hormigón con características especiales, como el hormigón ligero utilizado para aislamiento térmico. Así, el amplio uso de este material se atribuye particularmente a los beneficios de la reducción de la masa y densidad específicas, al ahorro que conlleva el encofrado, el apuntalamiento y en los costes de transporte de piezas en el caso de estructuras prefabricadas (Khodabakhshian et al., 2018; Zhang et al., 2020).

El hormigón celular es otro tipo de material menos denso, que es el principal objeto de estudio de esta investigación, donde se produce con aditivos que incorporan burbujas de aire en el hormigón, reduciendo su masa específica (Stumm; Schweike; Stemmermann, 2018; Trong; Asamoto; Matsui, 2018; He et al., 2018; He et al., 2019). Considerando los diversos usos del hormigón celular en cuanto a sus características a la luz de ligereza y menor peso específico, existe una preocupación por el uso de este tipo de material para partes estructurales de hormigón armado, en cuanto a su comportamiento frente a la propagación de la corrosión de barras de acero, debido a la cantidad de huecos en el interior del material y menor resistencia mecánica (Du et al., 2020). La durabilidad del hormigón es un tema fundamental, ya que nos permite comprender el comportamiento del material a lo largo de la vida útil de una estructura (Kashani et al., 2017). Además, puede verse afectado por la acción de agentes agresivos externos, como los iones de cloruro y (CO₂) - dióxido de carbono (Shon et al., 2018; Nascimento et al., 2021).

Uno de los principales problemas relacionados con la durabilidad del hormigón armado es la corrosión de las barras de acero que puede provocar la pérdida o degradación de las propiedades estructurales del material. Según Badar et al., (2014), el hormigón de buena calidad proporciona las condiciones necesarias para promover el pH de la capa pasivante de acero.

La principal hipótesis de este estudio es la siguiente: ¿los vacíos presentes por la incorporación de aire en el interior del hormigón celular "mitigan" la corrosión de las barras de acero y hacen que el proceso sea asintomático, es decir, sin fisuras ni manchas en la cara externa de el elemento? Esta hipótesis se vuelve viable al observar que los hormigones que pasan por el proceso del ciclo de congelación-descongelación están "protegidos" con la incorporación intencional de aire.

En resumen, entonces, el principal objetivo del estudio es evaluar el comportamiento de elementos de hormigón armado bajo el proceso de corrosión al utilizar hormigón celular (con aire incorporado). Esta investigación no solo proporciona una referencia para determinar el comportamiento del hormigón celular, sino también una propuesta que incluye alguna información útil para su aplicación en el sector de la construcción civil.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para la fabricación de hormigón celular se utilizaron los parámetros estudiados por Mariz (2013), quien realizó evaluaciones de durabilidad sobre hormigón celular. Los parámetros de prueba fueron seleccionados como base inicial para los procedimientos de dosificación y sus resultados, en cuanto a masa específica, fueron similares a los analizados en este estudio. El cemento utilizado fue el tipo CPV - ARI MAX, una marca nacional. Se eligió este tipo de aglutinante debido a su rápido aumento de resistencia y ausencia de aditivos.

El contenido de adiciones minerales contenidas en otros tipos de cemento podría contribuir al refinado y llenado de poros en el interior del hormigón, lo que dificulta la entrada de agentes agresivos y, en consecuencia, evita el inicio del proceso de corrosión de las barras de acero.

Se utilizó el agregado natural fino (arena), de origen cuarzo, de la Región Metropolitana de Recife/PE. La arena natural fue adquirida por una empresa teniendo en cuenta sus características físicas. El material estaba en estado húmedo y por lo tanto era necesario corregir el contenido de agua mediante secado natural. Para garantizar el contenido de humedad, se colocaron 600 g de material en un horno durante aproximadamente 24 horas a una temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y, luego de este procedimiento, se utilizaron 300 g para la prueba de caracterización granulométrica teniendo en cuenta la granulometría del agregado fino según la norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

En este contexto, fue necesario analizar la zona óptima de uso del agregado fino (arena), ya que puede influir en la densidad ideal del compuesto cementoso (hormigón). A través de la distribución granulométrica de los agregados, fue posible obtener parámetros como MF - (módulo de finura) de 2.93 y $D_{\text{máx}}$ - (diámetro máximo) de 4.5 mm, clasificándose como agregado fino con granos medianos bien distribuidos. Los resultados se pueden ver en la (Figura 1).

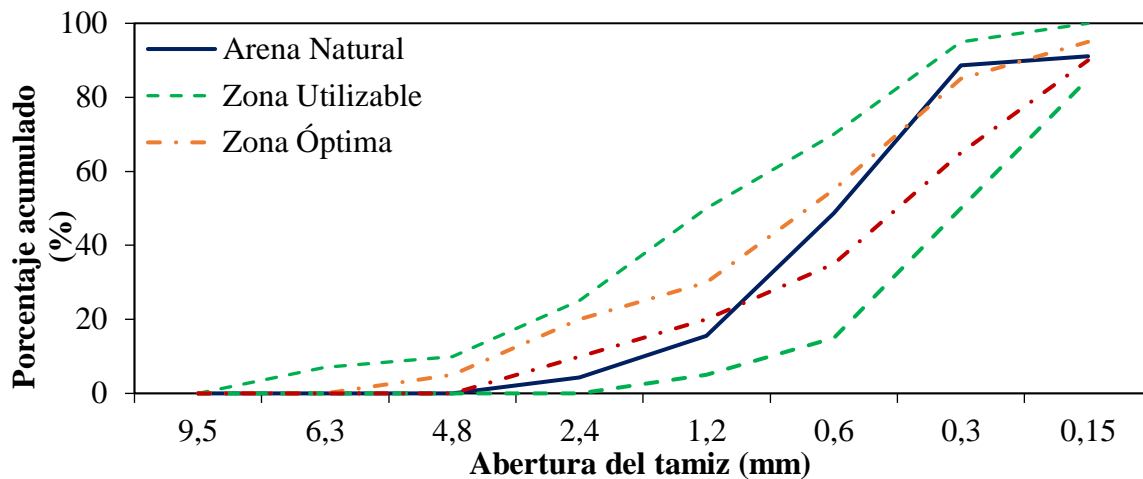


Figura 1. Curva de tamaño de partícula (agregado fino).

También se analizaron los agregados gruesos (grava) y, luego de la clasificación granulométrica, se observó que tienen un $D_{\text{máx}}$ de 12.5 mm y un MF de 6.48. Este valor se eligió teniendo en cuenta el espesor de la losa de hormigón con solo ($e = 50$ mm), respetando la recomendación de que la $D_{\text{máx}}$ sea menor o igual a $1/4$ de la dimensión más pequeña del molde. La curva de tamaño de partícula del material no se expuso en esta investigación, pero el tipo de agregado utilizado se clasificó como grava 1.

Los Aditivos utilizados fueron: Aditivo 1 - Techniflow 520, de MC Bauchemie. Este aditivo plastificante se utilizó en la dosificación matricial de hormigón con masa específica normal (familia R); aditivo 2 - Gethal 2011, de Gethal. Es un aditivo químico/orgánico concentrado en base atmosférica. Se utiliza en la producción de hormigón con una masa específica inferior a 2000 kg/m^3 (familias L1, L2 y L3).

Después de las pruebas preliminares, la mezcla unitaria utilizada para la producción de los especímenes fue: $1_{\text{Cemento}} : 2.2_{\text{Arena}} : 2.6_{\text{Grava}} : 0.60_{(a/c)}$ (relación de mezcla por peso) donde, en masa, se obtuvo 353 kg/m^3 de cemento, $776,6\text{ kg/m}^3$ de arena, 917 kg/m^3 y 211,8 litros de agua; $M\% = 55\%$ (contenido de mortero); $A\% = 10,5\%$ (relación agua-material seco); Aditivo plastificante = $0,6\%$. Para hormigón ligero, se sustituyó el aditivo plastificante por el filtro de aire ($0,1\%$ correspondiente a la masa de cemento), variando el tiempo de mezclado.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparación de barras de acero

Antes de la prueba, las barras se desinfectaron de acuerdo con la norma internacional G1-03 (ASTM, 2017). Se cortaron 72 barras de acero de cada calibre (6,3 mm, 8,0 mm y 10,0 mm) a 30 cm de longitud y se cortaron 48 barras de cada calibre a 20 cm de longitud. Después de este proceso, las barras de acero se colocaron en una solución elaborada con 500 ml de ácido clorhídrico, 3,5 g de hexametilentetramina y 1 L de agua durante 15 minutos. Luego, se lavaron bajo agua corriente con la ayuda de cepillos de acero, donde se eliminaron la capa de óxido superficial y las impurezas. Después del secado, las barras se pesaron antes de la inducción del proceso corrosivo.

2.2.2 Muestras utilizadas para análisis

La metodología utilizada para desarrollar este estudio se organizó para desarrollar las condiciones para comprender el comportamiento de elementos de hormigón armado ligero (hormigón celular) bajo el proceso de corrosión de las armaduras. Durante todo el proceso, los elementos del material fueron evaluados mediante pruebas electroquímicas (potencial de corrosión y resistividad) y pruebas físicas en barras de acero (pérdida de masa y resistencia a la tracción). Los ejemplares se desarrollaron en forma de placa, (35 cm de ancho x 35 cm de alto x 5 cm de espesor) como se puede apreciar en la (Figura 2).

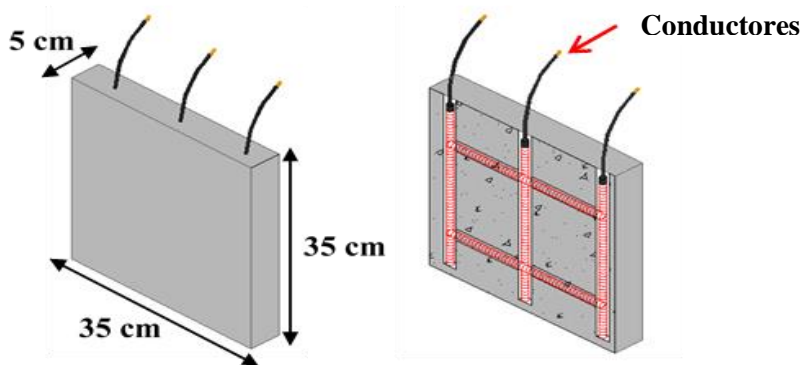


Figura 2. Representación esquemática de la configuración de la muestra.

Los conductores de cobre permitían la conexión de las barras de acero al exterior, controlando así el potencial de corrosión. La elección de utilizar placas de solo 5 cm de espesor tuvo como objetivo facilitar la activación del proceso corrosivo mediante la entrada de iones cloruro, reduciendo la distancia entre la barra y la superficie externa. Las muestras se distribuyeron entre hormigones con masa específica común (referencia) y tres tipos de familias de hormigón celular - (L1, L2 y L3) con masas específicas ligeras. Esta distribución se puede ver en (Tabla 1).

Tabla 1. Número de placas desarrolladas y su comportamiento mecánico.

Familias concretas	Masa específica en estado fresco (kg/m ³)	Medidores de acero – CA 50 (mm)			Número total de especímenes	Fuerza compresiva (MPa)
		6,3	8,0	10,0		
R	2,3	6	6	6	18	33,5
L1	1,9	6	6	6	18	8,94
L2	1,7	6	6	6	18	2,15
L3	1,5	6	6	6	18	0,61

Para fines de análisis, se desarrolló una malla de acero con tres barras verticales y dos barras horizontales, totalizando cinco barras dentro de cada molde de hormigón. Las barras verticales sirven como elementos de conexión para las tres barras horizontales (Figura 3), creando una mayor densidad del acero dentro de la placa y, en consecuencia, aumentando la posibilidad de observar los síntomas característicos de la corrosión del acero.

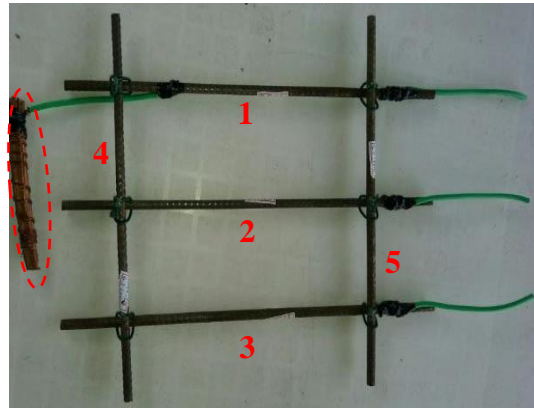


Figura 3. Proceso de organización y conexión de barras de acero.

Para la elaboración de las probetas se utilizaron ocho placas (2,10 mx 1,20 m) de madera revestida con un espesor de 18 mm. El encofrado revestido se eligió para proporcionar un mejor acabado superficial de las losas de hormigón y, además, para optimizar su producción, transporte y hormigonado. Así, se eligió un modelo rectangular con dimensiones de (1,50 m x 0,65 m x 0,35 m) con tabiques internos. Cada molde rectangular contiene 36 moldes. Este modelo se muestra en (Figura 4).



Figura 4. Molde rectangular capaz de producir 36 moldes.

2.2.3 Fabricación de probetas de hormigón y retirada de encofrados.

Se produjeron un total de 72 placas (35 cm x 35 cm x 5 cm) y también se realizaron probetas cilíndricas para los ensayos de caracterización mecánica del hormigón, pero los resultados no fueron presentados en esta investigación. Debido a la delgadez de la placa, de tan solo 5 cm, con el fin de facilitar la operación de hormigonado y asegurar un buen acabado y relleno del encofrado, no se utilizaron espaciadores para alinear la malla metálica. Las barras se centraron dentro del molde a mano. Después de retirar las placas, se mantuvieron protegidas de la lluvia directa y la luz solar durante (28 días) y se inició el proceso de mojado y secado en una solución de agua salada. Antes del inicio del proceso de corrosión, se realizó una inspección visual con un registro fotográfico para mantener las características físicas externas de las placas.

2.2.4 Inducción de corrosión de barras de acero.

Se utilizaron dos procedimientos para inducir la corrosión de las barras de acero contenidas en las placas de hormigón. El primer procedimiento, llamado (tipo 1), aplicó el principio de corrosión galvánica. El cobre actúa como cátodo y el acero se convierte en ánodo, perdiendo electrones (corrosión). Además, el material se conectó a la malla de acero (Figura 5 (a) y (b)) de cada placa, ubicada en la parte inferior del formulario.

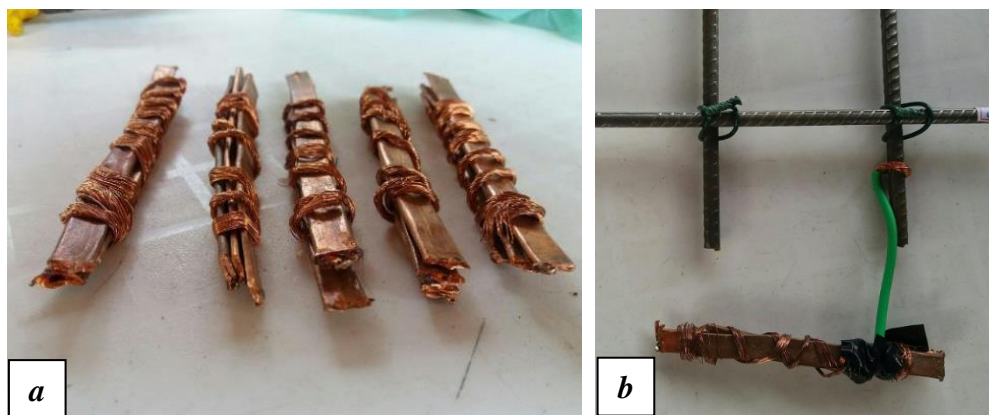


Figura 5. (a) Cobre para incidencia de corrosión galvánica; (b) Material conectado a la malla de acero.

El segundo procedimiento (tipo 2) de inducción de corrosión se realizó insertando las losas de concreto ya moldeadas (Figura 6 (a) y (b)), mediante ciclos repetidos de húmedo y seco utilizando agua en una solución de NaCl al 5% (cloruro de sodio), basado en la literatura y también en la investigación realizada por Ye et al., (2017). Después de 28 días, se realizó otra inspección visual y pruebas electroquímicas (potencial y resistividad) antes de iniciar el proceso de inmersión de la placa. Un ciclo completo consistió en tres días de inmersión (unos 25 cm de agua cubriendo las placas) y cuatro días de secado al aire (protegido de la luz solar directa).



Figura 6. (a) Muestras de hormigón fundido; (b) Losas de hormigón insertadas en una solución de NaCl para la inducción de iones de cloruro.

2.2.5 Ensayos de control de producción de hormigón

Durante la producción del hormigón se realizaron dos ensayos para controlar sus características. Fueron: masa específica de hormigón en estado fresco y endurecido, realizada según NBR 9833 (ABNT, 2008) y, para hormigón ligero, el resultado se obtuvo de acuerdo con los procedimientos establecidos por NBR 12644 (ABNT, 2014). Se realizaron ensayos de caracterización del hormigón

para cada familia de acuerdo a sus masas específicas, con el fin de tener parámetros comparativos y su respectivo comportamiento durante el proceso de corrosión de las barras de acero.

2.2.6 Revestimiento de barras de acero y espesor de losas de hormigón.

Para verificar el revestimiento de las barras de acero en ambos lados de las losas después del hormigonado, se utilizó equipo basado en sensores electromagnéticos. Este equipo, Ferroskan PS200 de Hilti, se utilizó para estimar el recubrimiento promedio de las barras en cada una de las placas. Además, se tomaron algunas imágenes para verificar el posicionamiento de las barras. A y B fueron nomenclaturas dadas a las caras de las placas para representar el posicionamiento de la malla de acero, como se indica en la (Figura 7).

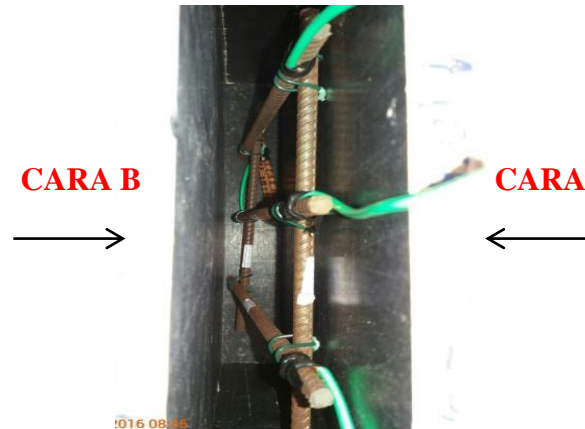


Figura 7. Representación esquemática de las caras A y B de las placas.

Luego, se midió el espesor de las placas con una cinta para calcular la cobertura de las barras de acero en relación a la cara A.

2.2.7 Pruebas de seguimiento físico

La prueba de control físico se dividió en dos fases: inspección visual de las placas y pérdida de masa. En cuanto a la inspección visual de las placas, se realizó un primer análisis a los pocos días del hormigonado y antes del inicio de los ciclos de mojado y secado. Durante el período de estudio, se llevaron a cabo otras inspecciones visuales al final de cada ciclo de inmersión aplicado a las placas para monitorear la evolución de la degradación. Para analizar el aspecto visual de las placas, se desarrolló un criterio de evaluación para este estudio basado en la existencia de manchas de corrosión y fisuras características que pueden aparecer en la superficie, como se muestra en la (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios para la valoración visual del nivel de degradación de la losa.

Sin manchas ni grietas	Irrelevante	●
Hasta tres pequeños puntos	Deterioro leve	●
Entre cuatro y cinco manchas pequeñas y/o una grande	Moderar	●
Más de cinco puntos pequeños y/o más de uno grande	Alto	●
Grietas y manchas de corrosión	Muy alto	●

El segundo tipo de prueba de monitoreo físico fue la evaluación de la masa de las barras perdidas al final del proceso de corrosión. Con esta información se pudo verificar qué placas y qué familias fueron más afectadas por el tiempo de exposición al agente agresivo. Después de retirar todas las barras de acero, se limpiaron con una solución de ácido clorhídrico y agua, eliminando cualquier residuo de hormigón que pudiera haberse adherido a las barras, así como los productos de corrosión en exceso. Luego de una limpieza a fondo, se pesó cada barra, lo que permitió verificar la pérdida de masa, comparando los valores antes y después del período de estudio. NBR 7480 (ABNT, 2007) indica los requisitos y criterios para el uso de barras de acero para hormigón armado. Para este caso, la norma establece el valor de la masa de las barras por unidad de longitud, según cada calibre, y también valores de tolerancia.

2.2.8 Ensayos de monitorización electroquímica

Se utilizaron dos tipos de pruebas para monitorear la evolución y probabilidad de corrosión de las barras de acero presentes en las placas a lo largo del tiempo, el potencial de corrosión y la resistividad de la superficie del concreto. La prueba de potencial de corrosión se realizó de acuerdo con C 876 (ASTM, 2015), que guía la evaluación de los criterios de prueba. El equipo utilizado fue el Canin + de Proceq +. Se probaron doce puntos en cada placa: tres líneas horizontales, una en la parte superior, una en el medio y una en la parte inferior, con cuatro puntos en cada línea. Estos puntos se ubicaron a 10 cm de distancia. De esta forma, fue posible mapear todo el potencial de corrosión de las placas en diferentes partes.

Para medir la resistividad superficial del hormigón, se utilizó el método de cuatro electrodos (método Wenner) con el equipo Resipod de Proceq. Al igual que con la prueba de potencial de corrosión, se roció agua sobre la superficie del concreto antes de tomar las lecturas. Según lo recomendado por TC154-EMC (RILEM, 2003), cada medición de resistividad tomada fue un promedio de cinco lecturas tomadas con unos pocos milímetros de diferencia.

Antes del inicio de cada ciclo de mojado y secado, es decir, después del período de secado de cuatro días, inmediatamente antes de la re-inmersión de las placas en agua, se realizaron las pruebas de monitoreo electroquímico mencionadas anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La principal hipótesis de este estudio cuestiona si el proceso de corrosión de las barras de acero en el hormigón celular puede ser asintomático (sin fisuras ni manchas), diferente al hormigón tradicional y, para ello, conviene hacer algunas consideraciones. No se observó agrietamiento en ninguna de las losas de hormigón celular ni en la mezcla de referencia (R). En cuanto a la tinción, solo 7 placas (10%) fueron asintomáticas, tres de la familia R y cuatro de la familia L1.

No fue posible afirmar, solo con las condiciones desarrolladas en este estudio, que el proceso de corrosión de barras de acero en concreto liviano no generará grietas. Namkung et al., (2019) y Pachla et al., (2021) afirman que para valores de pérdida de masa más altos, diferentes a los encontrados aquí, se genera un mayor volumen de productos de corrosión, lo que lleva a mayores tensiones de expansión y, en consecuencia, a la aparición de microgrietas.

Según Zhang et al., (2020), la porosidad y el tamaño de los poros ejercen efectos significativos sobre el comportamiento mecánico del hormigón celular. La etapa de compactación inicial del material tiene un cierto grado de dependencia de la porosidad, que se explica por el colapso y compactación de los poros o defectos superficiales. Aunque el 90% de los tableros se colorearon en diferentes grados e intensidades, hay que tener en cuenta el revestimiento variable de estos tableros.

La aparición más frecuente de manchas se encontró en la cara "A". Al analizar la cantidad estimada de recubrimiento, en general, para todas las familias, la cara "A" era más delgada que la cara "B". Es posible que se encuentren comportamientos diferentes cuando hay mayor cobertura y uniformidad.

Información interesante sobre las placas de la familia L1, que resultaron asintomáticas, se relaciona con su cobertura frente a la protección de las barras de acero. Tres de los cuatro tenían revestimientos más delgados que el promedio familiar, pero no se formaron grietas. Estos resultados no corroboran los análisis realizados por Green (2020), donde informa que el proceso de corrosión y, en consecuencia, la tinción, es independiente de la cobertura de las barras de acero y ocurre de manera significativa en ambientes agresivos.

Las placas de las familias L2 y L3, las más porosas, se clasificaron visualmente como más degradadas, como lo constata la pérdida de masa mediante pruebas de seguimiento electroquímico. También hubo una marcada disminución en la resistencia a la compresión cuando se integraron mayores cantidades de aire en el hormigón. Por esto, algunas losas tuvieron la mayor pérdida de masa de las barras de acero, y la familia L3 tuvo el segundo mayor porcentaje de pérdida.

Para niveles más altos de pérdida de masa, se espera que se forme una mayor cantidad de productos de corrosión y estos aparecerán con mayor intensidad en la superficie de las placas, como se observa en el estudio de Du et al., (2020). Sin embargo, el resultado de algunas de las placas en relación con el proceso de corrosión y tinción fue contrario a lo esperado. Estos tableros se clasificaron visualmente por tener una ligera degradación. Este es un ejemplo donde existe la posibilidad de que los poros "absorban" las manchas (Figura 8 (a) y (b)) y en (Figura 9 (a) y (b)) y este comportamiento también fue visto por Liu et al., (2020) y Liu et al., (2021).



Figura 8. (a) “Absorción” de productos de corrosión a través de los poros; (b) Mapa de potencial de corrosión (efectos severos no aparentes).

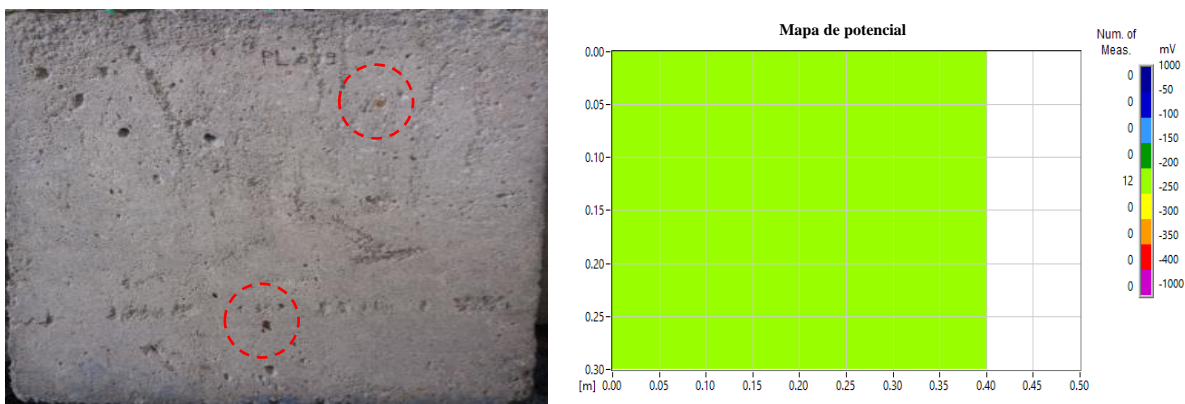


Figura 9. (a) “Absorción” de productos de corrosión a través de los poros; (b) Mapa de potencial de corrosión (efectos severos no aparentes).

Aunque se trata de un hecho aislado dentro de un comportamiento general, no debe ignorarse. Finalmente, en cuanto a la durabilidad y otras propiedades del hormigón, se observó que los hormigones ligeros estudiados eran más susceptibles a la degradación de las barras de acero que los hormigones de referencia.

Chung et al., (2019), Dong et al., (2020), Al-Shwaiter, Awang y Khalaf (2021) informan que la incorporación de materiales de baja densidad en el hormigón reduce el consumo de energía, pero tiene características que cumplen con mínimos mecánicos. Propiedades para ser utilizadas eficazmente como materiales de construcción.

3.1 Inspección visual

De las 18 placas en cada familia, el grupo R tenía un 67% clasificado como leve y dos como sin importancia. La segunda familia "mejor" en términos de menor degradación visual, L1, tenía sólo dos placas clasificadas con un alto grado de degradación. Las dos familias más degradadas visualmente, según la clasificación propuesta, fueron L2 y L3, con 44% y 61% de las placas clasificadas como de alto grado de degradación, respectivamente. Estos análisis se pueden ver mejor en (Figura 10).

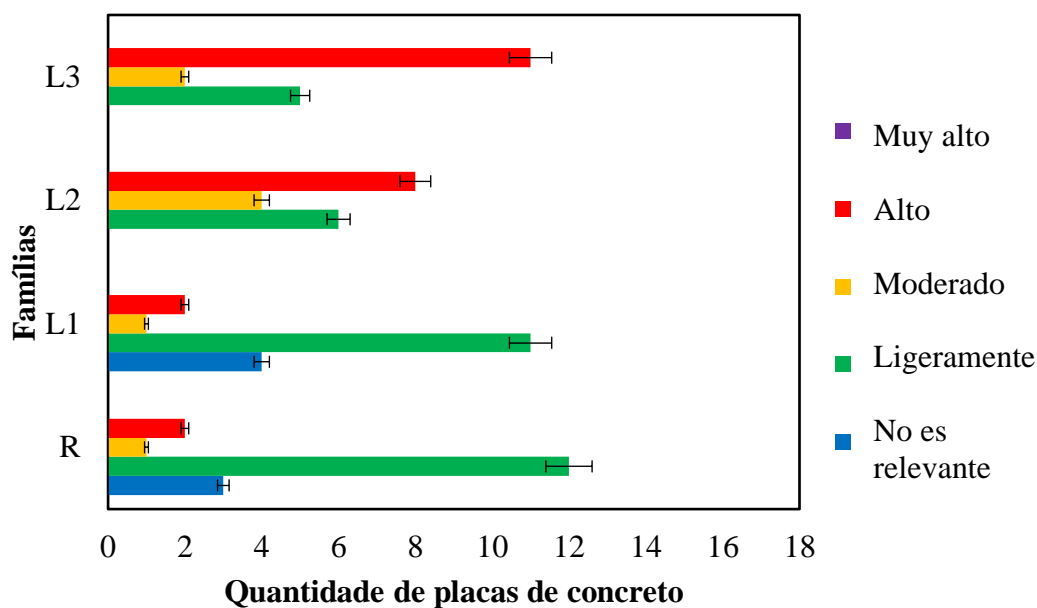


Figura 10. Clasificación cualitativa del nivel de degradación visual de las placas.

En cuanto al comportamiento físico de las losas de hormigón, se observó que la solución de $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ - cloruro de sodio desencadenó el proceso de corrosión de las barras de acero, donde se apreciaron algunas manchas en la superficie de las losas. En la (Figura 11 (a) y (b)), correspondiente a las placas de la familia R, no hubo evidencia de un alto nivel de degradación y el mapa de potencial de corrosión indicó que los valores oscilaron entre -350 mV y -400 mV

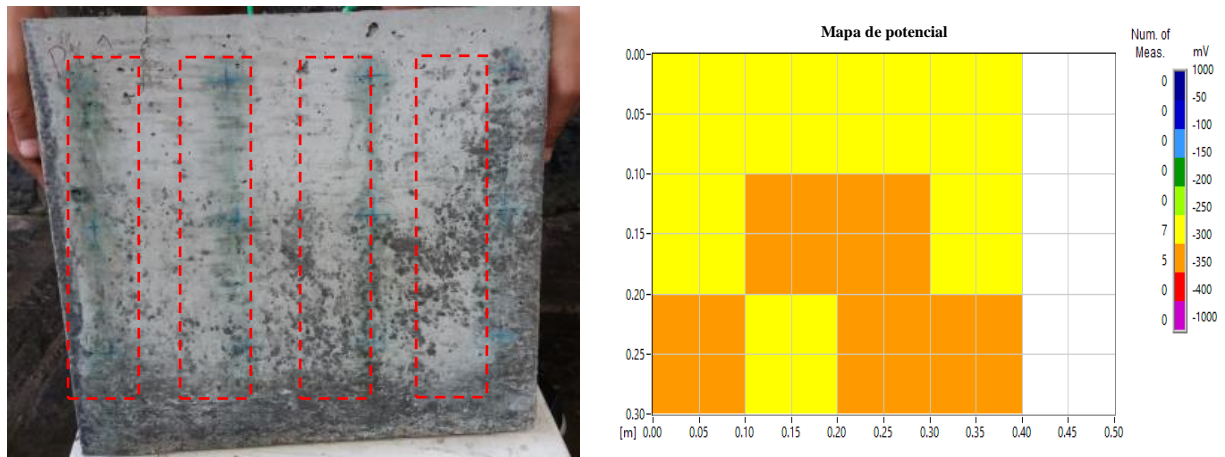


Figura 11. (a) Efectos de la degradación superficial de losas de hormigón; (b) Mapa de potencial de corrosión (efectos de luz).

En cuanto a las placas de la familia L1, se notó que el proceso de degradación causado por la presencia de cloruro de sodio afectó la durabilidad de las barras de acero, como se observa en (Figura 12 (a) y (b)). Se produjo corrosión puntual en puntos específicos de la placa y se produjeron manchas superficiales en regiones donde la capa de hormigón era más delgada. El mapeo de barras de acero corroídas mostró que los valores de potencial de corrosión variaban de -250 mV a -350 mV.

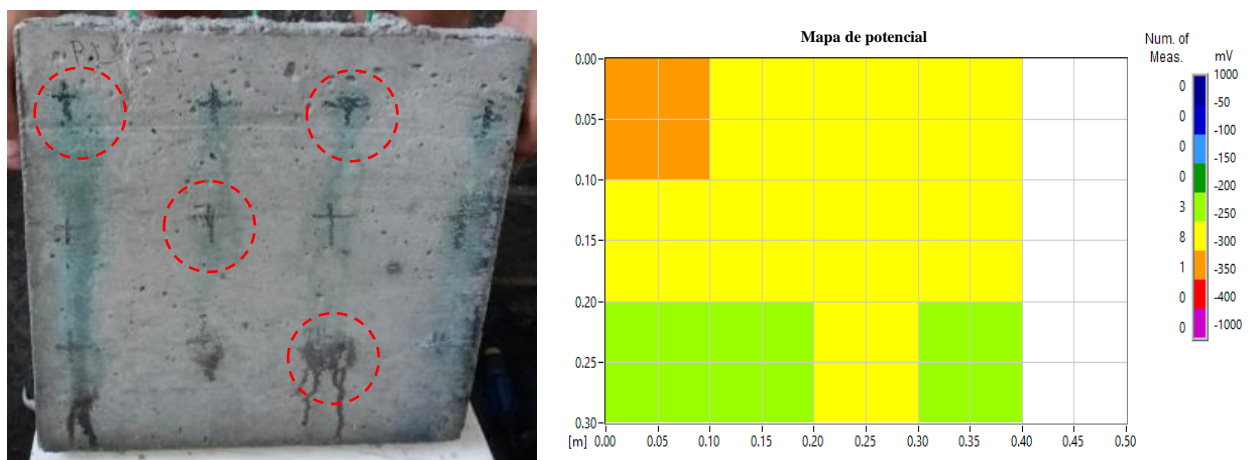
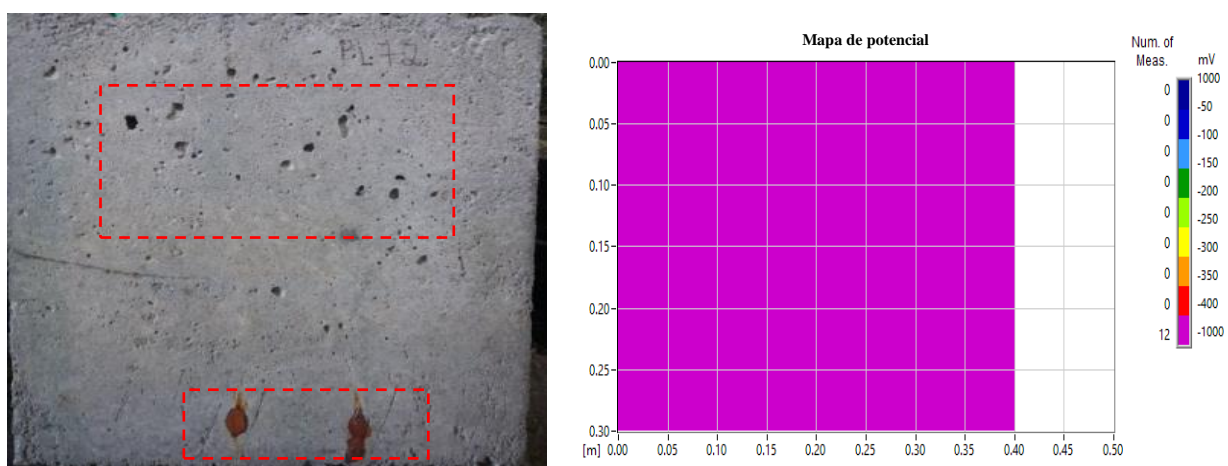
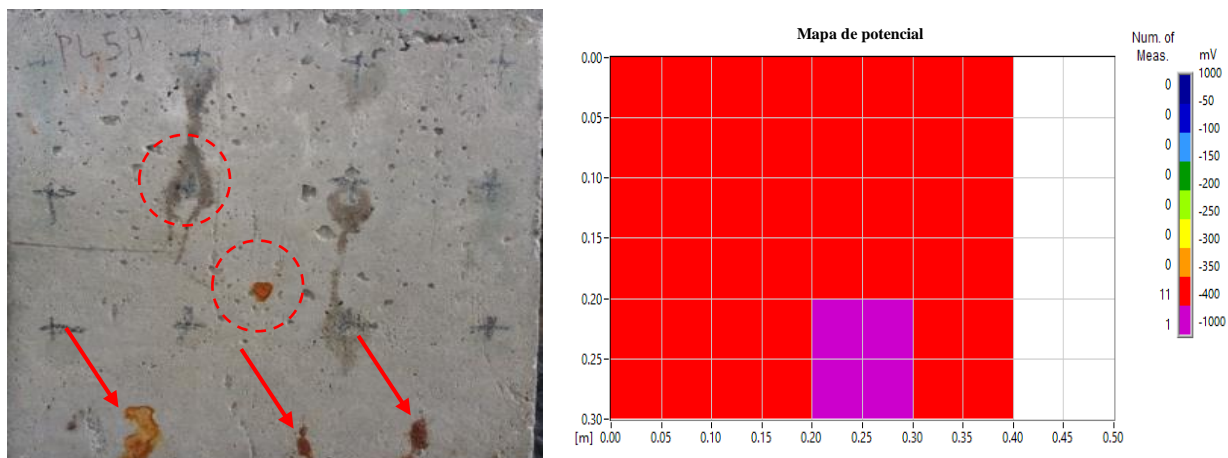


Figura 12. (a) Efectos de la degradación superficial de losas de hormigón; (b) Mapa de potencial de corrosión (efectos de luz).

El proceso de degradación de las armaduras en el interior de losas de hormigón de las familias L2 y L3 fue el más severo y las manchas superficiales provocadas por el transporte de óxidos a la superficie, se dieron por el comportamiento físico dentro del material. El contenido de aire incorporado resultó en una mayor tasa de vacíos que facilitó la entrada de iones cloruro, potenciando, sobre todo, la corrosión puntual. El mapeo de barras de acero corroídas mostró que los valores de potencial de corrosión variaban de -400 mV a -1000 mV para ambas familias, como se muestra en (Figura 13 (a) y (b)) y en (Figura 14 (a) y (B)).



3.2 Potencial de Corrosión

Los criterios de evaluación siguieron los procedimientos propuestos por C 876 (ASTM, 2015). Por lo tanto, a más valores electro-negativos que -350 mV, la probabilidad de que se produzca corrosión es del 90%. Los valores más electropositivos que -200 mV tienen una probabilidad de corrosión inferior al 10%.

Los valores entre estos límites están en el rango de incertidumbre. Durante el período experimental se realizaron 6 pruebas para medir el potencial de corrosión de las placas. El primero se llevó a cabo pocos días después del hormigonado y el segundo inmediatamente antes del inicio de los ciclos de inmersión en NaCl. Las otras pruebas se llevaron a cabo durante el estudio para monitorear la evolución de la corrosión de las barras de acero contenidas en las placas de hormigón. Los resultados del potencial de corrosión para cada familia se pueden ver en la (Figura 15). En este sentido, se entiende que el valor que representa el potencial de corrosión de la hoja debe ser el más electromecánico (es decir, la peor condición) entre los 12 puntos medidos.

Los puntos más oscuros observados después de la prueba muestran las regiones donde se tomaron las lecturas en un área de $(10\text{ cm} \times 10\text{ cm})$. Entre las 12 mediciones del potencial de corrosión, 10 caen dentro de la región de incertidumbre, pero con valores cercanos a la región segura. Los otros dos puntos están dentro de un área con menos del 10% de probabilidad de que ocurra corrosión.

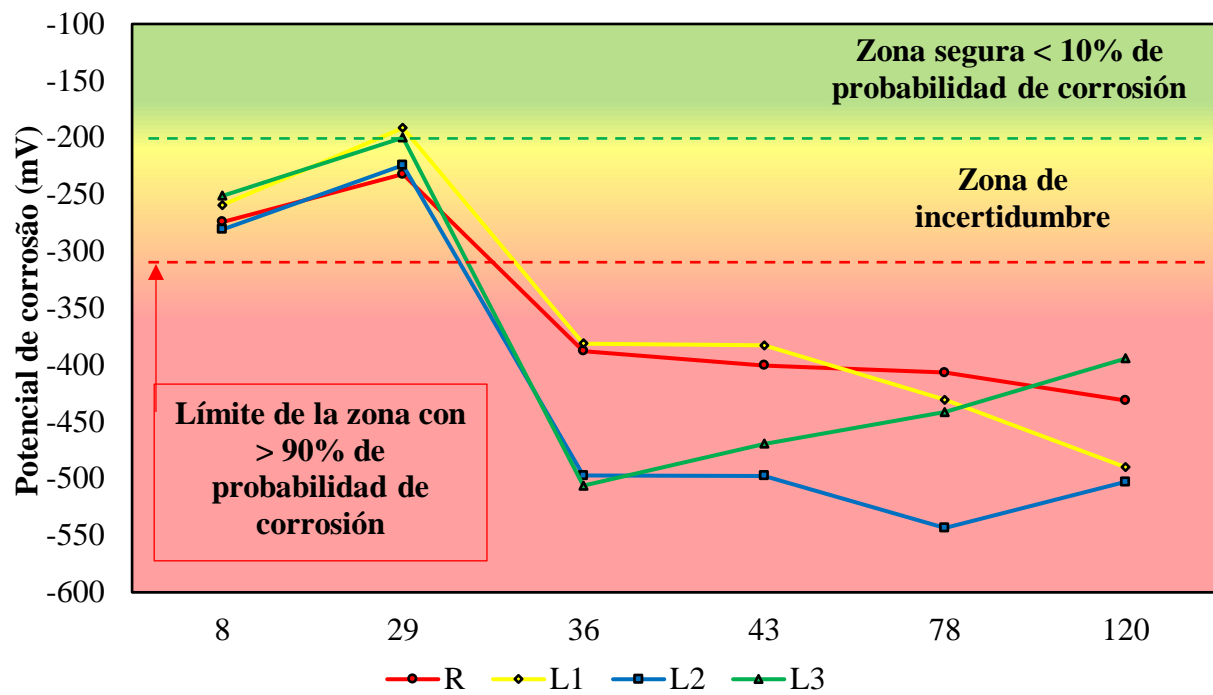


Figura 15. Comportamiento del potencial de corrosión promedio de las familias a lo largo del tiempo.

Se pueden hacer algunos comentarios sobre el rango de potencial de corrosión de las placas de todas las familias. Las primeras lecturas, tomadas pocos días después del hormigonado, se encuentran en la región ubicada en la zona de incertidumbre. Según Hou et al., (2021) esto ocurre debido a la presencia de cal en la superficie del hormigón o la formación de una película de agua en la barra de acero.

En la segunda medición, existe una tendencia a que el potencial se mueva hacia la zona "segura", con una probabilidad de corrosión menor al 10%. Este comportamiento se atribuye al mayor tiempo de curado, con los tableros más secos y protegidos. Inmediatamente después de la segunda lectura, comenzó el período de inmersión.

En la tercera lectura (a los 36 días), es posible ver una caída repentina en el potencial de corrosión, especialmente para las familias más porosas (L2 y L3). Al comparar la familia L3 con la familia R, se puede observar que la medida del potencial de corrosión a los 120 días es menos electronegativa, mostrando -394 mV en comparación con el resultado de la familia R que es -431 mV, es decir, un 9% menos. que la familia R, debido a la alta actividad electrolítica de los iones cloruro.

3.3 Resistividad eléctrica

Para comprender los efectos de la resistividad eléctrica sobre el hormigón celular, es necesario analizar los parámetros microestructurales del material, pero no fue una variable de estudio en este artículo. Según She et al., (2018), Han, Lee y Byun (2021), la formación de huecos o microporos en la matriz del compuesto cementoso potencia la difusión de agentes agresivos como el NaCl, ya que el tamaño de estos poros puede variar entre 100 μm a 350 μm , además de las diferentes formas como se ve en (Figura 16). Los autores también informan que cuanto mayor es el radio de los poros, mayor es la resistividad eléctrica, que varía de 2 μm a 5 μm .

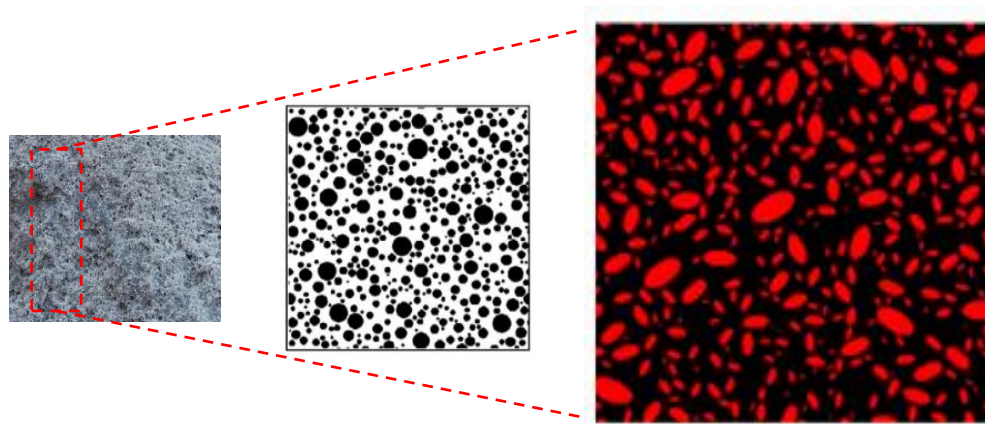


Figura 16. Ejemplos de poros distribuidos aleatoriamente con diferentes formas y microestructura generada aleatoriamente con radios entre 2 μm y 5 μm . Fuente: Adaptado de She et al., (2018).

En este contexto, la vigilancia de las estructuras de hormigón armado es necesaria, ya que existen entornos que exigen una mayor vida útil y servicio de las mismas. Uno de los temas a evaluar es el grado de degradación de las estructuras, dada la permeabilidad al cloruro de sodio (Yi et al., 2020). Según Lynch, Farrar y Michaels (2016), la resistividad eléctrica es un parámetro que se aplica a la detección de daños, pero los resultados de esta técnica, en algunos composites cementosos, pueden no ser viables debido a la influencia incierta de muchos factores en las mediciones obtenidas. En consecuencia, existen varios estudios sobre la influencia de factores individuales para mejorar la confiabilidad de los resultados, tales como: geometría de la probeta, relación agua/cemento, tipos de materiales de golpeo, tamaño de agregado, condiciones de curado y presencia de barras de acero (Sánchez et al., 2016). Para este estudio se desarrollaron placas de hormigón, conteniendo barras de acero en su interior y, en cuanto a la medida de resistividad eléctrica de las placas durante el período de permeabilidad al NaCl, inicialmente se observaron valores superiores para las familias L2 y L3 con 22.9 K Ω .cm y 36,2 K Ω .cm, respectivamente, de los cuales se pueden ver en (Figura 17).

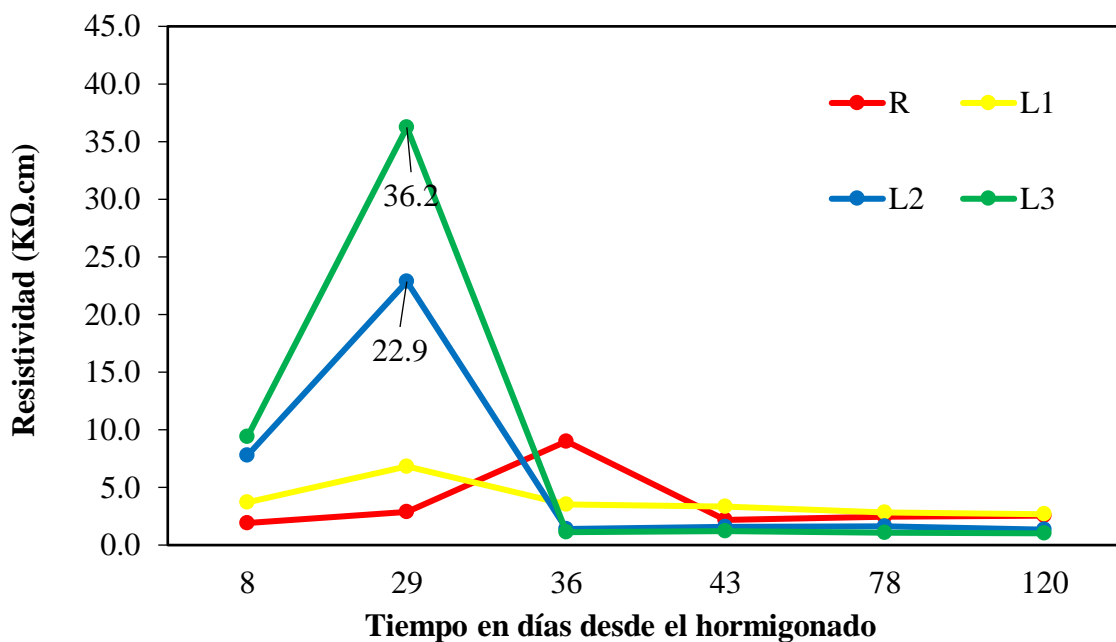


Figura 17. Comportamiento de la resistividad de la superficie del hormigón a lo largo del tiempo.

La investigación realizada por Dong et al., (2020), corroboró los resultados obtenidos en este estudio, ya que la resistividad eléctrica de sus muestras aumentó bruscamente de 4.5 KΩ.cm a 16 kΩ.cm en 29 días. Para contextualizar mejor este punto, un período de "descanso" más largo en un lugar seco, protegido de la lluvia y el sol, mejora la resistividad específicamente para matrices cementosas con niveles más altos de aire incorporado (que puede perder más fácilmente la humedad retenida) hasta por 29 días, debido a la cantidad de poros formados.

Tras el inicio de las inmersiones, se produce una fuerte caída de la resistividad, manteniéndose hasta el final del período de estudio en torno a valores de 1 a 10 KΩ.cm, lo que indica una alta tasa de actividad / corrosión, según los criterios adoptados. Los datos corroboran los estudios realizados por Michel, Sørensen, Geiker (2021), donde los resultados no indicaron ninguna diferencia significativa en la resistividad eléctrica, ya que oscilaron entre 0,5 y 2,5 KΩ.cm.

Los estudios realizados por Alnahhal et al., (2021) y Lokeshwari et al., (2021) indican que el uso de materiales de menor densidad en concreto celular puede mejorar la resistividad eléctrica, donde varía de 2.5 kΩ.cm a 5.0 kΩ. cm. Los resultados no corroboran los obtenidos en el estudio, ya que a mayor porcentaje de aire incorporado, mayor velocidad de corrosión de las barras de acero. Este comportamiento posiblemente se pueda explicar por la presencia constante de iones cloruro (electrolitos fuertes, que facilitan el movimiento iónico) y la posible retención de humedad dentro de las losas de hormigón, ya que fueron colocadas secas al aire por periodos de 4 días. En cuanto a la resistividad eléctrica de la superficie de las placas, todas las familias tuvieron un comportamiento similar. Según Dong et al., (2020), una hidratación más intensa puede conllevar un mayor consumo de cemento y, sobre todo, altas temperaturas entre el interior y el exterior del hormigón debido al calor liberado. Este proceso puede formar microestructuras que permitan el paso de partículas de iones cloruro al interior del compuesto cementoso y, a su vez, reducir la resistividad eléctrica. Por otro lado, los primeros cien días del período de curado son significativos para asegurar una resistividad eléctrica suficiente para contener la difusividad de los iones cloruro, ya que cuanto más denso es el material, menor es la porosidad.

3.4 Pérdida de peso

La pérdida de masa total de barras de acero por familia siguió una secuencia, como se muestra en la (Figura 18). Las familias L2 y L3, además de demostrar valores de corrosión potencial más electronegativos, así como un grado visual más degradado (cuantitativa y cualitativamente), también obtuvieron una mayor pérdida de masa de acero (valores absolutos y porcentajes).

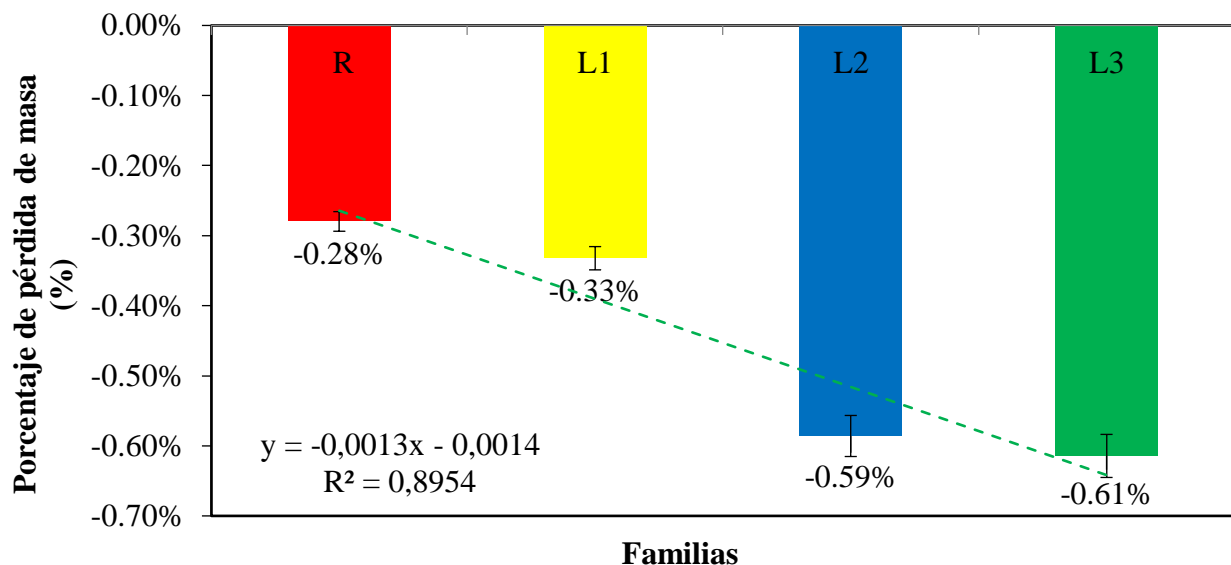


Figura 18. Porcentaje de pérdida de masa total de barras de acero por familia.

Entre los análisis realizados, se observó que las losas de hormigón tienen un porcentaje de pérdida de masa de barras de acero cercano al 2%, pero cuando se analizaron en conjunto (familias), este valor osciló entre 0,6% y 1%. Un mayor período de inmersión en la solución de NaCl probablemente produciría mayores valores de pérdida de masa, pero para este estudio no fue necesario, ya que los resultados obtenidos son considerables en cuanto a la formación de productos de corrosión. En este contexto, la familia L3 tuvo un mayor porcentaje de pérdida de masa (Figura 19), en comparación con las familias L1 (Figura 20) y L2 (Figura 21). Este comportamiento pudo haber ocurrido debido al contenido de aire formado en la mezcla de material en la matriz de cemento, haciéndolo fijo. Otra variable que se puede tener en cuenta es el tiempo de mezclado de las mezclas de hormigón, que estuvo entre 5 min a 20 min, donde el contenido de aire formado osciló entre 5% y 40%.



Figura 19. Pérdida de masa de barras de acero (L3).



Figura 20. Pérdida de masa de barras de acero (L2).



Figura 21. Pérdida de masa de barras de acero (L1).

En la (Figura 22) se observa que a mayor porcentaje de aire incorporado al interior del compuesto cementoso (hormigón celular), mayor es la pérdida total de masa de las barras de acero, ya que la tasa de vacío facilita la entrada de agentes agresivos. Al observar la interacción de las variables dependientes e independientes, se notó que el avance de los productos de corrosión frente al contenido de aire incorporado crece exponencialmente como se puede analizar por $R^2 = 0.9482$.

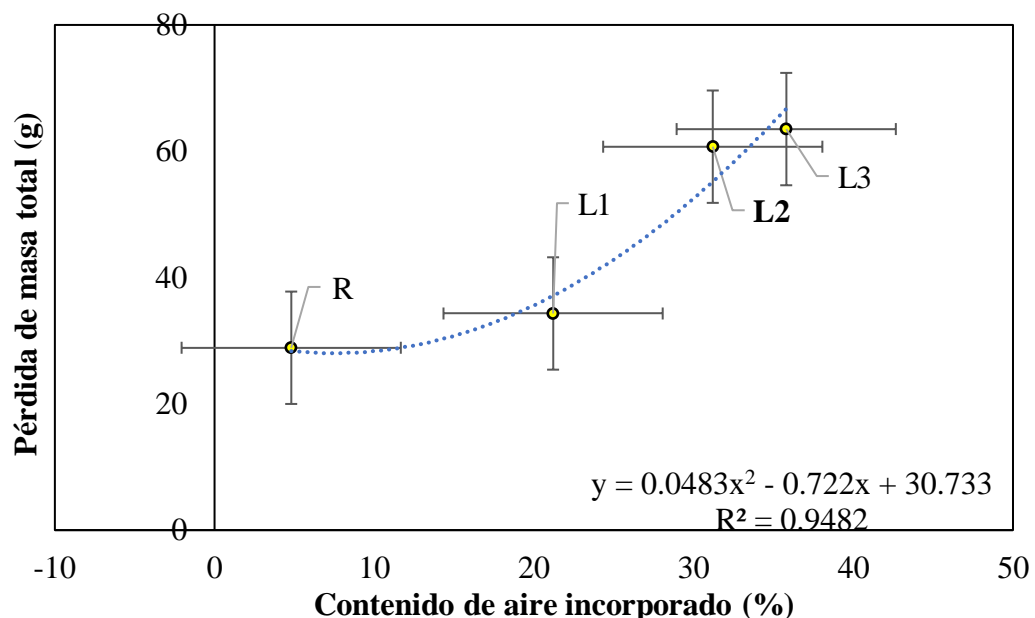


Figura 22. Regresión lineal de los datos obtenidos.

La pérdida de masa de la familia L3 (hormigón celular) fue un 55% mayor que la de la familia R (hormigón de referencia). Estos resultados muestran que el contenido de aire incorporado al hormigón debe ser inferior al 10%, ya que interfiere con la mejora de las propiedades mecánicas y, además, potencia el proceso de corrosión de las barras de acero integradas en el material. En este sentido, la baja resistividad de la masa de hormigón tiende a valores menos electropositivos (E_{corr}), notando que las lecturas del potencial de corrosión no siempre se atribuyen al tiempo de exposición del material en ambientes agresivos, sino también al tipo de aditivo utilizado y al Pérdida de masa de las barras de acero en el interior del compuesto cementoso. Para contextualizar mejor este punto, en la (Figura 23 (a)), se notó que todas las familias (R, L1, L2 y L3) tenían lecturas de potencial de corrosión entre -250 mV a -600 mV, pero los datos no eran estadísticamente diferentes. con una varianza del 5%, como se muestra en el diagrama de Pareto (Figura 23 (b)).

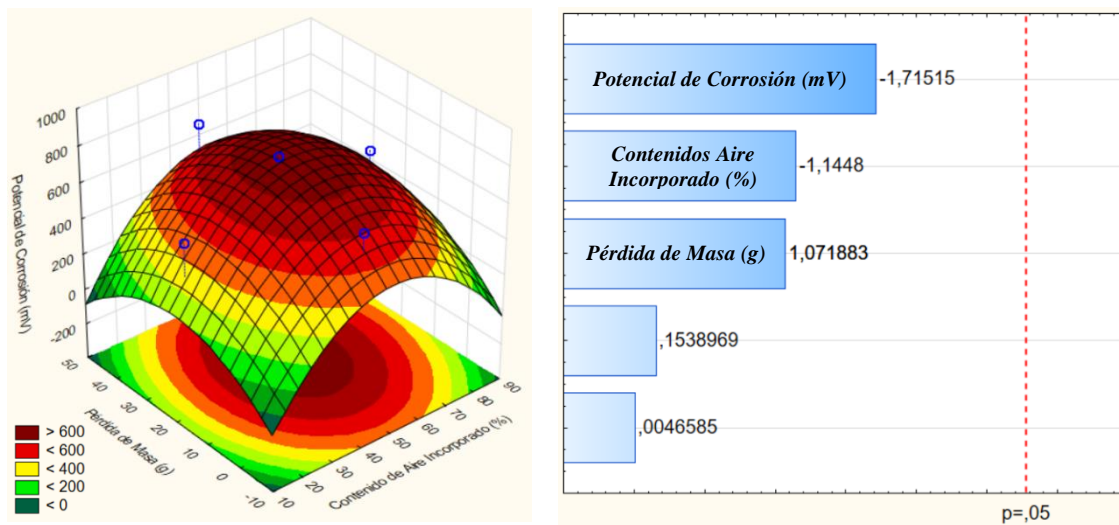


Figura 23. (a) Respuesta de la superficie como variables que influyen en el potencial de corrosión (b) Diagrama de Pareto.

4. CONCLUSIONES

Al investigar si la corrosión del refuerzo en el hormigón celular es asintomática, no se observó la presencia de grietas en ninguna familia de hormigón ensayada. Sin embargo, es necesario señalar que en relación a la aparición de grietas, cabe señalar que la no ocurrencia ocurrió para los parámetros específicos de esta obra, por ejemplo, el revestimiento utilizado (5 mm) en condiciones severas de exposición. a los ciclos de humectación y secado en solución de NaCl. Otras consideraciones fueron relevantes para las pruebas realizadas, tales como:

- En cuanto a la tinción, a pesar del alto índice de placas que presentan este síntoma, la ocurrencia puede estar relacionada con la cobertura variable entre las caras de las placas (A y B). Sin embargo, las familias de concreto que tenían niveles más altos de aire incorporado, tenían mayor absorción de agua, menor masa específica y resistencia a la compresión.
- En cuanto a las pruebas, las familias L2 y L3 (mayor contenido de aire), fueron visualmente más degradadas, además de obtener las mayores pérdidas de masa de acero. Así, la hipótesis inicial, dados los resultados y análisis realizados, puede descartarse, pues de acuerdo a los resultados obtenidos, cuanto mayor es la incorporación de aire, en lugar de mitigar la corrosión, existe una mayor probabilidad de que el hormigón presente corrosión de la armadura.

- En cuanto a los análisis de inspección visual, el grupo R tenía el 67% de las placas clasificadas como de grado ligero y dos placas sin relevancia. Con el porcentaje de 0.1%, la familia L1 tuvo un menor grado de degradación que las familias L2 y L3, con 44% y 61% de las placas clasificadas como de alto grado de degradación, respectivamente;
- En cuanto al potencial de corrosión, las familias R, L1, L2 y L3 tienen el mismo comportamiento en 29 días, con una medida más electropositiva de -200 mV. Durante los 120 días, el potencial de corrosión de la familia L3 es menos electronegativo y posiblemente ocurre debido a la alta actividad electrolítica de los iones cloruro en las capas más internas del hormigón celular;
- En cuanto a los resultados de resistividad eléctrica, se conoce que en 29 días las familias L2 y L3 tuvieron un gran incremento debido a la estabilidad interna de los vacíos y la presencia de agua que se pierde con facilidad. Este comportamiento confiere al hormigón celular de las dos familias un riesgo de corrosión insignificante, ya que es superior a 20 K Ω .cm. A los 36 días, todas las familias presentan un riesgo de corrosión muy alto, ya que los valores obtenidos se encuentran entre 0 y 5 K Ω .cm;

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es de gran relevancia para la comunidad científica / académica y no sería posible sin la colaboración de todos los participantes. También queremos agradecer a la Universidad de Pernambuco, la Universidad Católica de Pernambuco y, sobre todo, a las agencias de financiación de la investigación del CNPq “*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*” y CAPES “*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*”.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003), *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007), *NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008), *NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014), *NBR 12644: Concreto celular estrutural – Determinação da densidade do concreto no estado fresco*. Rio de Janeiro.
- Al-Shwaiter, A., Awang, H., Khalaf, M. A. (2021), *The influence of superplasticiser on mechanical, transport and microstructure properties of foam concrete*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 1(1):1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.010>
- Alnahhal, A. M., Alengaram, U. J., Yusoff, S., Singh, R., Radwan, M. K. H., Deboucha, W. (2021), *Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material*. Journal of Building Engineering. 35(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102047>
- ASTM G1-03, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM C876-15, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

- Badar, S., Patil, K. K., Bernal, S. A., Provis, J.L., Allouche, E. N. (2014), *Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes*. Construction and Building Materials, 62(1):79-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015>
- Chung, S-Y., Elrahman, M. A., Kim, J-S., Han, T-S., Stephan, D., Sikora, P. (2019), *Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations*. Construction and Building Materials. 211(1):988-999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.270>
- Dong, Y., Su, C., Qiao, P., Sun, L. (2020), *Microstructural crack segmentation of three-dimensional concrete images based on deep convolutional neural networks*. Construction and Building Materials. 253(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119185>
- Dong, W., Huang, Y., Lehane, B., Ma, G. (2020), *XGBoost algorithm-based prediction of concrete electrical resistivity for structural health monitoring*. Automation in Construction. 114(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103155>
- Du, F., Jin, Z., She, W., Xiong, C., Feng, G., Fan, J. (2020), *Chloride ions migration and induced reinforcement corrosion in concrete with cracks: a comparative study of current acceleration and natural marine exposure*. Construction and Building Materials. 263(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120099>
- Green, W. K. (2020), *Steel reinforcement corrosion in concrete – an overview of some fundamentals*. Corrosion Engineering, Science and Technology. 55(4):289-302. <http://dx.doi.org/10.1080/1478422x.2020.1746039>
- Han, W., Lee, J. S., Byun, Y. H (2021), *Volume, strength, and stiffness characteristics of expandable foam grout*. Construction and Building Materials. 274(1):1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122013>
- He, T., XU, R., Chen, C., Yang, L., Yang, R., Yongqi, D. (2018), *Carbonation modeling analysis on carbonation behavior of sand autoclaved aerated concrete*. Construction and Building Materials. 189(1):102-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.199>
- He, X., Zheng, z., Yang, J., Su, Y., Wang, T., Strnadel, B. (2019), *Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials*. Journal of Cleaner Production. 19(2):2-49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119455>
- Hou, L., Li, J., Lu, Z., Niu, Y. (2021), *Influence of foaming agent on cement and foam concrete*. Construction and Building Materials. 280(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399>
- Kanellopoulos, A., Savva, P., Petrou, M. F., Ioannou, I., Pantazopoulou, S. (2020), *Assessing the quality of concrete – reinforcement interface in Self Compacting Concrete*. Construction and Building Materials. 240(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117933>
- Khodabakhshian, A., Brito, J., Ghalehnovi, M., Shamsabadi, E. A. (2018), *Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder*. Construction and Building Materials. 169(1):237-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>
- Kashani, A., Ngo, T. D., Mendis, P., Black, K. R., Hajimohammadi, A. (2017), *A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete*. Journal of Cleaner Production. 17(3):1-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>
- Liu, X., Ni, C., Meng, K., Zhang, L., Liu, D., Sun, L. (2020), *Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash*. Construction and Building Materials. 251(1):1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118954>

- Liu, X., Sun, D., Liu, D., Meng, K., Ni, C., Shao, Z., Sun, L. (2021), *Simulation of ultrasonic propagation in porous cellular concrete materials*. Construction and Building Materials. 285(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122852>
- Lynch, J. P., Farrar, C. R., Michaels, J. E. (2016), *Structural health monitoring: technological advances to practical implementations*. Proceedings of the Ieee. 104(8):1508-1512. <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2016.2588818>
- Lokeshwari, M., Bandakli, B. R. P., Tarun, S. R., Sachin, P., Kumar, V. (2021), *A review on self-curing concrete*. Materials Today: Proceedings. 1(1):1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.859>
- Mariz, J. C. (2013), “*Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado*”. Monograph presented as a partial requirement for Bachelor's degree in Civil Engineering from the Polytechnic School of Pernambuco – University of Pernambuco.
- Mechtcherine, V., Michel, A., Liebscher, M., Schneider, K., Großmann, C. (2020), *Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: material and automation perspectives*. Automation in Construction. 110(1):1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103002>
- Michel, A., Sørensen, H. E., Geiker, M. R. (2021), *5 years of in situ reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element*. Construction and Building Materials. 285(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122923>
- Namkung, H., Lee, Y-J., Park, J-H., Song, G-D., Choi, J W., Kim, J-G., Park, S-J., Park, J C., Kim, H-T., Choi, Y-C. (2019), *Influence of herbaceous biomass ash pre-treated by alkali metal leaching on the agglomeration/sintering and corrosion behaviors*. Energy. 187(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.115950>
- Nascimento, C. F. G., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Silva, F. G. A., Neves, D. C. M., Pedrosa, P. G. V., Valões, D. C. P., Monteiro, E. C. B. (2021), *Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto armado frente a corrosão de armadura desencadeada por carbonatação acelerada*. Conjecturas, 21(4):569-599. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-237-801>
- Nguyen, Q. D., Castel, A. (2020), *Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete*. Cement And Concrete Research. 132(1):1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106051>
- Pachla, E. C., Silva, D. B., Stein, K. J., Marangon, E., Chong, W. (2021), *Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites*. Construction and Building Materials. 283(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>
- RILEM TC 154-EMC. Recommendations of RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures*. ISSN: 1359-5997. RILEM Publications SARL. Vol 36, 2003.
- Sanchez, J., Andrade, C., Torres, J., Rebolledo, N., Fulla, J. (2016), *Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements*. Materials and Structures. 50(1):1-10. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0884-7>
- She, W., Zhao, G., Cai, D., Jiang, J., Cao, X. (2018), *Numerical study on the effect of pore shapes on the thermal behaviors of cellular concrete*. Construction and Building Materials. 163(1):113-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.108>
- Shon, C. S., Lee, D., Kim, J. H., Chung, C. W. (2018), *Freezing and thawing resistance of cellular concrete containing binary and ternary cementitious mixtures*. Construction and Building Materials. 168(1):73-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.117>
- Stumm, A., schweike U., Stemmermann, P. (2018), *Nanostructured high insulating autoclaved aerated concrete*. Mauerwerk. 22(5):329-334. <http://dx.doi.org/10.1002/dama.201800024>

- Trong, L. N., Asamoto, S., Matsui, k. (2018), *Sorption isotherm and length change behavior of autoclaved aerated concrete*. Cement and Concrete Composites. 94(1):136-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.003>
- Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., Huang, T. (2017), *Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes*. Construction and Building Materials, 140(1):173-183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>
- Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C. (2020), *A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment*. Cement and Concrete Composites, 113(1):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., Sun, B. (2020), *Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete*. Construction and Building Materials, 241(1):1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Deng, G., Wei, P. (2020), *Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores*. Construction and Building Materials. 235(1):1-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117508>

Uso práctico del factor de seguridad en la estrategia de reparación de columnas de un edificio de concreto con valor histórico

J. A. Briceño-Mena¹ , P. Castro-Borges^{1*} 

*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

Recepción: 09/11/2021 | Aceptación: 21/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

En este trabajo se presenta el uso práctico del factor de seguridad (FS) en la estrategia de reparación de columnas en un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años). Se llevó a cabo la reparación del 80% de un edificio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Campeche, México, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Se utilizaron estrategias para una mejor utilización de los recursos materiales, equipamiento y mano de obra en la reparación de muros, columnas, losas y trabes. Una de las estrategias fue usar el FS teórico para calcular la profundidad de reparación sin consecuencias estructurales, pero cumpliendo la finalidad de controlar la carbonatación del concreto, y manteniendo la predicción deseada de vida de servicio.

Palabras clave: reparación; concreto reforzado; durabilidad; factor de seguridad.

Citar como: Briceño-Mena, J. A., Castro-Borges, P. (2022), “Uso práctico del factor de seguridad en la estrategia de reparación de columnas de un edificio de concreto con valor histórico”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 98 – 109, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

¹ Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor J.A. Briceño-Mena contribuyó con la actividad de experimentación de campo (60%), recolección de datos (50%), escritura del trabajo (50%), discusión de resultados (50%); el autor P. Castro-Borges contribuyó con la idea original, experimentación de campo (40%), recolección de datos (50%), escritura del trabajo (50%), discusión de resultados (50%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Practical use of the safety factor in the column repair strategy of a concrete building with historical value

ABSTRACT

In this paper the practical use of the safety factor (FS) in the column repair strategy of a reinforced concrete building with historical value (almost 70 years) is presented. 80% of a building located in the historic center of the city of Campeche, Mexico, declared a World Heritage Site by UNESCO, was repaired. Strategies were used for a better use of material resources, equipment, and labor in the repair of walls, columns, slabs, and beams. One of the strategies was to use the theoretical FS to calculate the repair depth without structural consequences but fulfilling the purpose of controlling the carbonation of the concrete and maintaining the desired prediction of service life.

Keywords: repair; reinforced concrete; durability; security factor.

Uso práctico do fator de segurança na estratégia de reparo de pilar em um edifício de concreto com valor histórico

RESUMO

Neste artigo discute-se o uso prático do fator de segurança (FS) na estratégia de reparo de pilares em um edifício de concreto armado com valor histórico (quase 70 anos). 80% de um prédio localizado no centro histórico da cidade de Campeche, no México, declarado Patrimônio da Humanidade pela UNESCO, foi reformado. Estratégias foram utilizadas para um melhor aproveitamento dos recursos materiais, equipamentos e mão de obra na reparação de paredes, pilares, lajes e vigas. Uma das estratégias foi utilizar o FS teórico para calcular a profundidade de reparo sem consequências estruturais, mas cumprindo o objetivo de controlar a carbonatação do concreto, e manter a previsão de vida útil desejada.

Palavras-chave: reparar; concreto reforçado; durabilidade; fator de segurança.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas comunes en las reparaciones del concreto estriba en el uso erróneo de las especificaciones estructurales para conocer la profundidad a la que deben realizarse, cuando se enfrentan problemas por cloruros o carbonatación. Ello trae como consecuencia un uso poco optimizado de la mano de obra, equipamiento y materiales que conlleva, no sólo a reparaciones equivocadas y el retorno del problema, sino también a una falta de sustentabilidad en todo el proceso. Este edificio con un espacio interno de más de 600 m² y una altura aproximada de 20 m, y una estructura a base de marcos, suponía una demolición y posterior construcción de uno nuevo de 4 niveles. Sin embargo, este plan fue reconsiderado debido a que el edificio en cuestión tenía una edad aproximada de 70 años y se encontraba en el centro histórico de la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche, México (Figura 1), declarado patrimonio de la humanidad en el año 1999 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Dicho lugar se encuentra protegido por autoridades federales como el Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura (INBAL) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Por lo tanto, más que un proceso de demolición se tenía que considerar una estrategia de reparación que cumpliera con las condiciones establecidas por las autoridades federales, donde se preservara lo más posible de la estructura (80%). Por tal motivo, se realizó un estudio extenso sobre la durabilidad del inmueble. Como consecuencia, se definieron las partes que se mantendrían en pie previo a una intervención que implicaría la reparación y/o refuerzo de los distintos elementos estructurales, evitando los procesos de demolición iniciales y acoplándose a las condiciones requeridas. Se planteó adosar una estructura nueva de manera interna al edificio ya reparado manteniendo así su arquitectura exterior y rescatando zonas interiores.

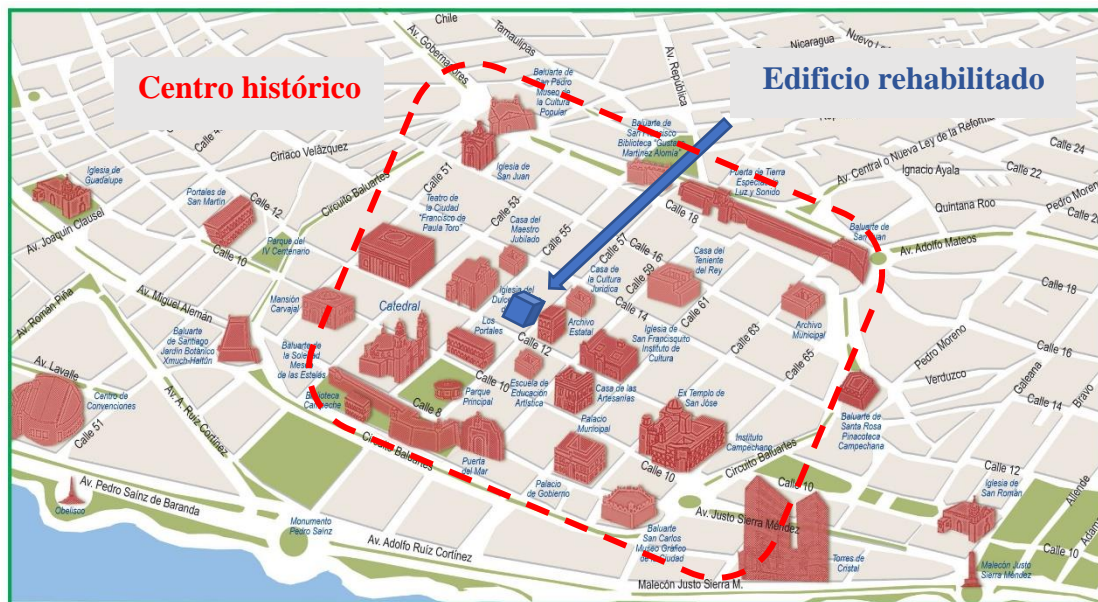


Figura 1. Ubicación de la estructura dentro de la zona protegida de Campeche¹

La estructura en cuestión tuvo como función primaria la de ser un cine, posteriormente funcionó como un estacionamiento y finalmente fue abandonada. Estos cambios de uso y el abandono fueron factores que potencializaron los daños, como se observa parcialmente en las fotos de la Figura 2.

¹ <https://programadestinosmexico.com/descubre-mexico/mapas/mapas-de-ciudad-de-campeche.html>



Figura 2. Estado en que se encontraba la estructura antes de ser intervenida

Para poder desarrollar una reparación óptima se debe considerar realizar un análisis estructural donde se consideren los procesos constructivos a llevar a cabo durante dicha intervención ya que, durante este proceso, se pueden ir agregando o quitando cargas debido a la demolición de elementos, vibraciones, cambios en las propiedades mismas de los materiales de reparación, cambios en la resistencia, apuntalamientos, entre otros (Ministerio de Vivienda y Urbanismo – Minvu, 2018; Allen, 1991). Por lo tanto, es importante establecer los valores con los que se trabajará, como son la resistencia antigua y nueva de los elementos, factores de seguridad, por mencionar algunos. En el presente trabajo se ilustra, para el caso de las columnas, como fue utilizado el factor de seguridad (FS) para la reparación del ex cine Selem.

1.1 El factor de seguridad como criterio de durabilidad de la reparación

En la literatura se puede encontrar información acerca de la Teoría de Seguridad (González Cueto Vila y Quevedo Sotolongo, 2007) que, en general, consiste en relacionar el nivel de seguridad (H) (1), definido como $H = 1 - pf$, donde pf es la probabilidad de falla. Este nivel de seguridad depende de todas las variables que intervienen en el diseño de la estructura y de cómo pueden variar los mismos. La ecuación general que rige la teoría de seguridad es:

$$H \geq H^n \tag{1}$$

Donde: H^n es el nivel de seguridad del diseño
 H es el nivel de seguridad de obra.

En Ingeniería Civil, se puede entender como seguridad el evitar que la estructura sobrepase el estado límite permisible, el cual es donde se considera que el comportamiento estructural es aceptable (Ridell y Hidalgo, 2010). El FS es aquel que relaciona la carga o sollicitación (C) a aplicarse en la estructura con la capacidad máxima (R) que esta puede soportar, es decir, su

resistencia máxima.

$$FS = \frac{C}{R} \quad (2)$$

El FS se considera al momento en el cual se está diseñando un elemento estructural pero también debe tomarse en cuenta cuando se realizan las reparaciones ya que éste, tiene una relación directa con la propia resistencia del material, así como en las dimensiones de la sección de los elementos. El FS se basa en dos coeficientes (ACI 318-19, 2019), un coeficiente de mayoración de cargas que consiste en incrementar de manera ficticia la carga que será aplicada a la estructura cuando se encuentre sometida a cargas reales durante su uso. Esto es, multiplicar la carga real esperada por un coeficiente de seguridad de mayoración de carga. El otro coeficiente es el de minoración de la resistencia misma del material que conforma el elemento. La resistencia de los materiales se reduce a comparación de los esfuerzos máximos admisibles. Esto es, dividir la resistencia de los materiales por un coeficiente de seguridad de minoración de resistencia. Por lo tanto, considerando un elemento que en teoría va a tener cargas mayores a las reales y con una resistencia menor a la propia, se tendrá una confianza en la seguridad que brinda el elemento aun en condiciones muy desfavorables durante su vida útil.

Poniendo un ejemplo ficticio práctico, se puede entender el FS de la siguiente manera: Suponiendo que se tiene una columna, la cual fue diseñada para soportar 6 toneladas de carga y en ella descansarán 2 vigas, y cada una de estas transferirá una carga de 2 toneladas a la columna. Por lo tanto, se puede apreciar que nuestro FS es de 1.5 ($FS = 6/4 = 1.5$). Aunque en este ejemplo se trató como un tema simple, en la realidad es algo mucho más complejo. Se deben considerar diversos criterios como son las cargas vivas (las personas que utilizarán el edificio), las cargas muertas (mobiliario, por ejemplo), las cargas accidentales, así como factores ambientales.

2. METODOLOGÍA DEL PROCESO DE REPARACIÓN

2.1 Inspección de daños

Antes de realizar cualquier intervención en la estructura, fue necesario realizar una inspección de los daños, basada en la normativa mexicana (NMX-C-505-ONNCCE, 2016; NMX-C-520-ONNCCE, 2018), para poder establecer las estrategias de reparación. Dichas inspecciones ya han sido publicadas (Briceño-Mena et al, 2021) y pueden consultarse en la literatura para más detalle. Estas inspecciones tuvieron 4 ejes principales:

- Visual, para poder identificar las zonas con daños que requirieran una intervención mayor y posibles causantes de problemas patológicos como son zonas de humedad, así como desprendimientos, agrietamientos, etc.
- Mecánica, para conocer el estado del concreto como es su resistencia mecánica y poder establecer la resistencia del nuevo concreto a usar.
- Electroquímica, para conocer el estado del acero, que tan dañado podría estar por los problemas patológicos.
- Química, para determinar los agentes agresivos que están propiciando los daños en los elementos estructurales.

2.2 Estrategias de reparación

Después de la inspección realizada, se pudo constatar que los elementos estructurales y arquitectónicos podrían ser intervenidos para su consolidación con la nueva estructura a construirse al interior del edificio como parte de su cambio de uso. Todas las estrategias de reparación fueron establecidas para poder brindar a la estructura una nueva vida de servicio y una durabilidad contra

los problemas patológicos actuales y futuros a los que pudiese verse sometida, considerando las características mecánicas de los propios elementos, así como el uso de los factores de seguridad (NMX-C-530-ONNCCE, 2018; Val y Stewart, 2002; Melchers, 2001). A su vez, estas estrategias se basaron en experiencias previas y en la literatura como es el manual Rehabilitar (Helene y Pereira, 2003). El fin de estas reparaciones fue retirar el concreto dañado o que presentara algún problema patológico como carbonatación, así como asegurar la estabilidad estructural con el recálculo y restructuración de la cantidad de acero necesaria en los elementos, además de asegurar el recubrimiento adecuado según los requerimientos estructurales. La Figura 3 muestra procesos de deterioro de la estructura. Para delimitar las estrategias de reparación era necesario establecer los tipos de reparación a utilizar:



Figura. 3. Carbonatación y desprendimiento del concreto

2.2.1 Reparación superficial localizada (RSL).

Esta reparación se refiere a aquellos elementos que presentaran daños en el concreto con poca profundidad y extensión en relación con las dimensiones del elemento estructural. Por lo anterior se estableció una reparación en zonas puntuales donde se aprecien agrietamientos a una profundidad no mayor de los 3 cm o antes de llegar al acero de refuerzo

2.2.2 Reparación superficial uniforme (RSU).

Esta estrategia de reparación es parecida a la reparación superficial localizada ya que se realizará a una profundidad no mayor de los 3 cm, o antes de llegar al acero de refuerzo, pero contemplando la reparación en una extensión relativamente grande de acuerdo con las dimensiones del elemento estructural, delimitando para los trabajos una extensión máxima sobre el elemento de 1.5 m.

2.2.3 Reparación profunda localizada (RPL).

Esta reparación se llevará a cabo en los elementos estructurales donde se hayan identificado daños con extensión relativamente pequeña, siendo su profundidad mayor que 3 cm, afectando el concreto detrás de las armaduras.

2.2.4 Reparación profunda uniforme (RPU).

Al igual que en el apartado de reparación profunda localizada, la reparación se realiza a una profundidad más allá del acero. Sin embargo, al ser uniforme, se estableció la realización de la reparación por secciones máximas de 1.5 m, debido a cuestiones estructurales.

3. PLANTEAMIENTO Y USO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LAS REPARACIONES

Las técnicas de reparación planteadas se realizaron con el fin de aplicar en los procesos constructivos herramientas que permitan evitar procesos innecesarios como la demolición, que traerían consigo la generación de escombros y basura y más aún en zonas importantes como lo es un patrimonio de la humanidad.

Como punto de partida inicial para realizar la reparación, fue importante analizar cada elemento individualmente, su comportamiento, su carga portante máxima, su estado, y posteriormente proyectarlo a un nivel general relacionándolo con todos los elementos estructurales, obteniendo así un comportamiento global. De esta forma, fue posible realizar la intervención considerando todos los factores de afectación posibles y minimizando daños colaterales del proceso de reparación. Esto a su vez conlleva a realizar una capacitación del personal para elaborar las reparaciones ya que, en la actualidad, tanto los obreros como los ingenieros, desconocen de estos temas lo que provoca un uso incorrecto de herramientas, materiales y equipo.

Si bien, una estrategia de reparación puede ser realizada por gente capacitada, siempre es importante tener en cuenta los factores de seguridad y riesgo a la hora de trabajar.

La teoría del FS fue llevada a la práctica en el proceso de reparación de la estructura descrita en este trabajo. Para ello se requirió el apoyo de manuales, normativa, literatura y experiencia propia para establecer con el mejor criterio la estrategia idónea por elemento. Como se comentó anteriormente, gracias a la inspección previa se pudo establecer el grado de daño y con ello la estrategia de reparación. Si bien se establecieron 4 posibles, en este trabajo solo se discutirá lo relacionado a la reparación profunda uniforme (véase Figura 4)

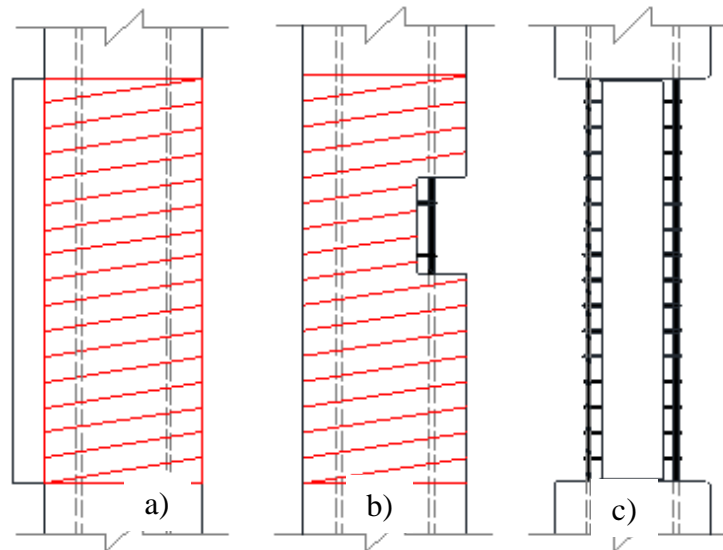


Figura. 4. Reparación profunda uniforme: a) Delimitación del área a demoler, b) escarificación iniciada, c) sección final después de escarificación

Para poder llevar a cabo las reparaciones, fue necesario establecer el criterio con el cual se realizarían. En el caso de esta estructura se tuvieron elementos de distintas dimensiones por lo que se establecieron criterios de reparación universales pero que tenían que ser verificados antes de su ejecución. Una RPU puede ser de una gran extensión o no en relación con el tamaño del elemento. Sin embargo, en este caso y para no recurrir a materiales, mano de obra y tiempo como es en el caso de la instalación de puntales de estabilización, se determinó por practicidad que lo mejor era realizar las reparaciones en tramos de 1.5 m lineales. A continuación, se presenta el ejemplo de una

columna tipo rectangular. La columna tipo (véase Figura 5), presentaba una sección transversal de 30x35 cm y con ayuda de las pruebas mecánicas realizadas se pudo obtener la resistencia promedio a la compresión del concreto, la cual se encuentra superior a los 200 kg/cm². Considerando la sección transversal del elemento y la mínima resistencia obtenida se puede deducir que la columna es capaz de soportar una carga axial de 210,000 kg. Ahora bien, si se escarifica el concreto en mal estado, y se repara más allá del refuerzo, recordando que la reparación profunda uniforme es la que se da más allá de los 3 cm o detrás del refuerzo, la nueva sección transversal del elemento es de 25x30 cm. Si se utiliza esta nueva sección transversal y la resistencia a la compresión obtenida anteriormente con los cilindros extraídos se puede determinar que la estructura, aún con la reducción en la sección de concreto, es capaz de soportar 150,000 kg. Si se considera que, por lo menos, el elemento fue diseñado con un FS de 1.5, entonces la estructura fue diseñada inicialmente para soportar una carga de 140,000 kg de forma segura. Por lo tanto, incluso después de escarificado, el elemento a reparar aún puede soportar las cargas ejercidas ya que es capaz de resistir hasta 150,000 kg. Esto podría no ser del todo cierto ya que no es un análisis que contemple todas las afectaciones posibles que puedan existir al momento de realizar las reparaciones. Sin embargo, es una buena estrategia para ser llevada en campo ya que permite una rápida apreciación de hasta donde se puede intervenir sin afectar estructuralmente al elemento y poder continuar con los trabajos de reparación una vez realizado el diagnóstico.

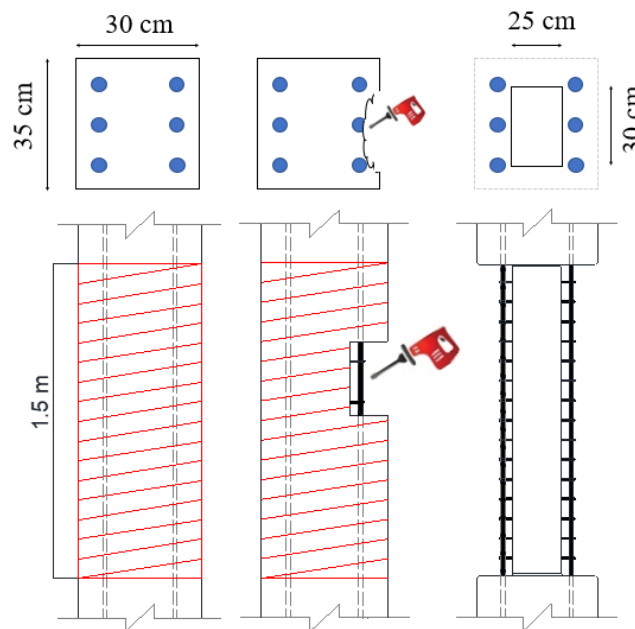


Figura. 5. Criterio de delimitación y escarificación de reparaciones

Para el proceso de reparación se realizó una guía la cual pudiera ser seguida con facilidad por los obreros y que a su vez fuera repetible en varios elementos. En la Figura 6 puede observarse este proceso. Para realizar las reparaciones y con el fin de controlar diversos problemas como son las contracciones por temperatura, módulos de elasticidad, etc, se optó por utilizar un concreto de características similares para realizar la reparación de los elementos.



Escarificación mecánica para eliminar el concreto en mal estado y descubrir el acero de refuerzo



Medición del diámetro del acero de refuerzo, si la pérdida de diámetro era mayor a la permisible, el acero era completado o sustituido. En algunos casos se colocó acero de refuerzo transversal completo por el desgaste excesivo



Se perforaron agujeros para la colocación del nuevo acero que sustituyera al corroído. Para su correcto anclaje, se inyectó una resina epóxica de alto rendimiento para altas cargas



Antes de realizar el desplante, la base de todos los elementos fue recubierta con un impermeabilizante asfáltico alrededor del suelo para evitar alguna penetración de humedad o agentes corrosivos



Por la experiencia previa de la inspección, se recomendó aplicar al acero un convertidor de óxido



Previo al colado, se aplicó un puente de adherencia para asegurar la homogenización del concreto nuevo con el viejo, éste también tiene la función de sellador



Posterior al colado y después del descimbrado, se aplicó una membrana de curado al concreto para asegurar la durabilidad

Figura. 6. Proceso de reparación profunda uniforme

Como es natural, el trabajo de los obreros suponía en alguna ocasión la rotura de la sección transversal del concreto o ir más allá de la sección mínima requerida según el FS. En estos casos las precauciones incluían no solamente apuntalamiento puntual, sino también tomar en cuenta el monolitismo de la estructura al transferirse las cargas excedentes de la sección contemplada hacia los elementos vecinos.

Con este trabajo se ha podido demostrar en forma sencilla la facilidad y confianza con la que puede abordarse una RPU en columnas tomando en cuenta un cálculo sencillo del FS. La Figura 7 muestra una vista nocturna del edificio ya recuperado.



Figura 7. Vista del edificio de la intervención

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como fin presentar el caso práctico de la reparación de las columnas de una estructura de concreto reforzado de 70 años, la cual se encontraba en estado de abandono y se había proyectado su demolición total. Por mandato de las autoridades se realizó un estudio de durabilidad que arrojó como resultado cambiar el proyecto de demolición a uno de reparación. Para realizar esta reparación, fue necesario consultar distintas fuentes didácticas como experiencias previas que arrojaron realizar un manual práctico para los obreros. Este manual se basó en criterios de durabilidad, así como en especificaciones de diseño que permitiesen trabajar con seguridad. El FS tuvo un papel importante en la determinación del mecanismo de reparación que trajo consigo un importante ahorro en recursos y tiempo. Con estos procedimientos de reparación se proyecta tener una estructura durable que sea capaz de cumplir con la vida de servicio establecida con un mantenimiento preventivo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Coppel SA de CV, la UACAM, Cinvestav, INAH e INBA. J.A. Briceño-Mena agradece la beca de doctorado de Conacyt.

6. REFERENCIAS

- American Concrete Institute (2019), *ACI 318-19 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Primera impresión: junio 2019. ISBN 978-1-64195-060-2
- Allen, D. E. (1991), “Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 995–1004, doi: <https://doi.org/10.1139/191-122>
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P., Pérez-López, T. (2021), “Extending the Service Life of a Historical Concrete Building”, *Materials Performance*, pp. 1–8, 2021. URL: <https://materialsperformance.com/articles/coating-linings/2021/04/extending-the-service-life-of-a-historical-concrete-building>
- González Cueto Vila, A. V., Quevedo Sotolongo G. (2007), “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad” *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 22 No. 2, pp. 81–88, www.ing.puc.cl/ricvol. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v22n2/art02.pdf>
- Ridell C. R., Hidalgo O. P. (2010), *Diseño Estructural*, Quinta. Pontificia Universidad Católica de Chile. I.S.B.N. 956-14-0463-X
- Helene, P., Pereira, F. (2003), *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón - reparación, refuerzo y protección*. Red Rehabilitar, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), 2003.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu (2018), *Vol. 4. Manual De Reparaciones Y Refuerzos Estructurales*. Editor: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional – Ditec, Minvu, ISBN: 978-956-9432-85-9. Gobierno de Chile, febrero de 2018.

Melchers, R. E. (2001), “*Assessment of existing structures—approaches and research needs*” J. Struct. Eng., vol. 127, no. 4, pp. 406–411, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(406\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(406))

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2016) *NMX-C-505-ONNCCE, Industria de la Construcción – Inspección Preliminar de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad - Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018), *NMX-C-520-ONNCCE, Industria de la Construcción-Inspección Detallada de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad-Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018) *NMX-C-530-ONNCCE, Industria de la construcción – Durabilidad – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Criterios y Especificaciones*.

Val, D. V., Stewart, M. G. (2002), “*Safety Factors for Assessment of Existing Structures,*” J. Struct. Eng., vol. 128, no. 2, pp. 258–265, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:2\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(258))

Estudio termográfico de las manifestaciones patológicas por humedades y del estado de conservación de la cubierta de la Basílica de Santa María

D. Bru^{1*}, S. Ivorra¹

*Autor de Contacto: david.bru@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.567>

Recepción: 01/11/2021 | Aceptación: 13/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

El presente trabajo analiza el estado actual de la cubierta de la Basílica de Santa María, Alicante, España. Este edificio data del siglo XIII y está catalogado. Para el análisis de las eflorescencias que se observan se realiza un análisis de la tipología constructiva, así como un análisis visual del estado de las mismas, describiendo las manifestaciones patológicas existentes, tanto en la zona exterior de las cubiertas, como en la zona interior de las salas bajo las mismas. Para el análisis técnico de las posibles filtraciones de la cubierta a las salas interiores de la basílica se realiza una prueba de estanquidad y la verificación a través del control de la variación de temperaturas mediante análisis termográfico. Se puede concluir la existencia y posición de filtraciones que han dañado este edificio catalogado.

Palabras clave: termografía, humedades, filtraciones, eflorescencias, edificio histórico.

Citar como: Bru, D., Ivorra, S. (2022), “Estudio termográfico de las manifestaciones patológicas por humedades y del estado de conservación de la cubierta de la Basílica de Santa María”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 110 – 126, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.567>

¹Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Alicante, España.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor David Bru contribuyó con la actividad de recolección de datos y experimentación en un 100%, con la actividad de idea original, escritura del trabajo y discusión de los resultados en un 50%. El autor Salvador Ivorra contribuyó con la actividad de idea original, escritura del trabajo y discusión de los resultados en un 50%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Thermographic study of the pathological manifestations due to humidity and of the conservation state of the Santa Maria Basilica's roof

ABSTRACT

This paper analyzes the current state of the roof of the Basilica of Santa Maria, Alicante, Spain. This building dates back to the 13th century and is catalogued. For the analysis of the efflorescence observed, an analysis of the constructive typology is carried out, as well as a visual analysis of the state of the same, describing the existing pathological manifestations, both in the exterior area of the roofs, as well as in the interior area of the rooms under them. For the technical analysis of the possible leaks from the roof to the interior rooms of the basilica, a watertightness test and the verification through the control of the variation of temperatures by means of thermographic analysis are carried out. It can be concluded the existence and position of leaks that have damaged this listed building.

Keywords: thermography, humidities, filtrations, efflorescence, historical building.

Estudo termográfico das manifestações patológicas devidas à umidade e do estado de conservação da cobertura da Basílica de Santa Maria

RESUMO

Este trabalho analisa o estado atual da cobertura da Basílica de Santa María, Alicante, Espanha. Este edifício data do século XIII e está catalogado. Para a análise das eflorescências observadas foi efetuada uma análise da tipologia da construção, bem como uma análise visual do estado dela, descrevendo as manifestações patológicas existentes, tanto na zona exterior das coberturas, como na área interna dos ambientes abaixo dela. Para a análise técnica de possíveis vazamentos através da cobertura para os ambientes interiores da basílica, foi efetuado um ensaio de estanqueidade e verificação através do controle da variação de temperatura por meio de análise termográfica. O procedimento foi adequado para entender e comprovar a existência e localização de vazamentos que danificaram este edifício.

Palavras-chave: termografia, umidade, infiltração, eflorescência, edifício histórico.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objeto la valoración técnica de las manifestaciones patológicas actuales del sistema de impermeabilización en la cubierta de la Basílica de Santa María, Alicante, España, Figura 1. La Basílica de Santa María, localizada en las coordenadas $38^{\circ}20'46''N$ $0^{\circ}28'45''W$ y dispuesta a menos de 300 m de la línea costera, ha sido catalogada como Bien de Interés Cultural dentro de los monumentos catalogados en el Patrimonio Cultural Valenciano estando datadas las partes más antiguas del edificio entre el siglo XIII y el siglo XIV. Desde el punto de vista arquitectónico, la estructura presenta una sola nave sin crucero, con capillas laterales situadas entre los contrafuertes y un ábside poligonal, Figura 2. La nave principal se haya cubierta por seis bóvedas de crucería de arco apuntado, separadas entre sí por arcos torales, que junto con los nervios arrancan del capitel en una solución propia de finales del siglo XV y de las primeras décadas del siglo XVI (Beviá et al, 1997).



Figura 1. Vista aérea de la Basílica de Santa María. Alicante. Sup. Izq.: fachada Noroeste. Sup. Drcha.: Fachada sudeste. Inferior: Vista en planta de la Basílica de Santa María. Alicante. Identificación de cubiertas de estudio. Fuente: Imágenes ©2016 Google, Datos del mapa ©2016 Google, Inst. Geogr. Nacional.

En relación a los principales materiales que constituyen los elementos de mampostería de la Basílica de Santa María, no se han realizado estudios de laboratorio para identificar su procedencia. Sin embargo, y según los datos históricos, se aportan en la presente investigación los datos asociados a las rocas de igual procedencia dispuestas en los Palacios Civiles de la calle Gravina (Louis et al. 2001), próxima a la localización de la Basílica. Los datos obtenidos de dicha investigación permiten clasificar la tipología de la roca utilizada, su resistencia a compresión y el coeficiente de absorción. En este sentido la roca consiste en una biocalcarenita con tamaño de grano variable, de arena media a arena gruesa e incluso microconglomerado (>2mm), con una elevada porosidad y una resistencia a compresión es de 6.1 MPa. Por otro lado, en relación al coeficiente de absorción, se muestran valores comprendidos entre el 6% y el 15%. En este sentido es importante destacar el elevado valor de los mismos en comparación con otras piedras tipo caliza o margas, con valores entre 0.56% y 2.05% (Thomas et al. 2008). Otros datos asociados al contenido de Calcita y a la densidad de dicho material, se muestran en la Tabla 1.

Finalmente, Louis et al (2001), también destacan un aspecto importante de cara al análisis de las patologías por presencia de humedades en este tipo de materiales. En concreto evalúan la presencia de eflorescencias y destacan el efecto altamente perjudicial de la cristalización de las sales en el proceso de erosión alveolar y especialmente en las zonas con las fachadas expuestas al viento marino, ya que este efecto favorece la cristalización de las sales y aporta gran cantidad de sal marina debido al efecto del spray marino. Estas afirmaciones se confirman por la presencia de halita en las eflorescencias de los interiores. Además, ponen de manifiesto que parte del cloruro sódico del ambiente marino o del agua de infiltración ha alcanzado parte del edificio analizado debido a los fenómenos de capilaridad. Por lo tanto, a partir de los resultados previos de Louis et al (2001), se puede afirmar la hipótesis de presencia de sales en los materiales constituyentes de la Basílica analizada.

Tabla 1. Datos de composición y algunas propiedades físicas de la Piedra de San Julián (Brotóns et al. 2013).

Piedra de San Julián	Cantera	Edificios
Calcita (%)	80-85	65-85
Absorción de agua (%)	7.6-15.1	6.2-13.0
Densidad real (g/cm ³)	2.64-2.67	2.59
Densidad aparente (g/cm ³)	1.85-2.29	1.8-2.4

El edificio analizado en el presente estudio se enmarca dentro de las tipologías de construcciones históricas, siendo su planteamiento constructivo muy diferente a las edificaciones de la actualidad. Desde el punto de vista higrotérmico, su principal diferencia es la concepción como edificio permeable al agua (en vapor o forma líquida), tanto del exterior como del interior (Paricio, 1985), a diferencia de los edificios actuales que se plantean como elementos aislados, para evitar la pérdida de energía hacia el exterior. Esquemáticamente, el edificio estudiado, tal y como se comentó en el apartado 1, presenta un cerramiento perimetral que se estima (con los medios disponibles) de una hoja de gran espesor. Este hecho provoca que, frente a la acción del agua exterior, la parte externa de la hoja en contacto con el agua se moje y difunda el agua en forma líquida a través del espesor del muro. El avance del agua a través del mismo va formando un “frente húmedo” hasta que la precipitación cesa. Dicha cantidad de agua permanece absorbida en la mampostería debido a la elevada capacidad de absorción de los materiales constituyentes de la fábrica para, posteriormente, ir evaporando el agua por ambas caras del cerramiento. Por lo tanto, se puede intuir la importancia del espesor y la permeabilidad del material, a fin de evitar que el frente húmedo aparezca en el interior de la estancia y, sobre todo, para que una vez finalizada la fuente de humedad se produzca la evaporación del agua en el menor tiempo posible, especialmente para evitar solapamientos de

frentes húmedos entre diferentes ciclos de precipitación. Por lo tanto, también es claro que la evacuación del agua en este tipo de edificaciones se produce de forma diferida por difusión y evaporación. Por lo tanto, es habitual observar en este tipo de edificaciones procesos de saturación del paramento por agua de lluvia, una vez saturados los poros y procesos de escorrentía superficial a lo largo del paramento, produciendo la humidificación de otras zonas del elemento dispuesto para el cerramiento de la construcción.

Por otro lado, en relación a los fenómenos dinámicos del agua en el interior de la construcción en forma de vapor, es importante destacar que, debido a la ausencia de láminas plásticas o barreras de vapor como las dispuestas actualmente en cubiertas y cerramientos modernos, el edificio se caracterizaba como eminentemente permeable. Siendo habitual que la humedad específica mínima de una sala sea la misma del exterior, dado que el aire es capaz de penetrar desde fuera sin estar sometido a ningún proceso de barrera. Por lo tanto, los problemas habituales de este tipo de construcciones al enfrentarse contra la humedad en su concepción original era el de intentar eliminar los excesos de vapor generados en el interior de las salas debidas a la respiración y transpiración humanas, con el objeto de igualar la humedad específica interior a la del exterior. De esta forma, tal y como se ha comentado anteriormente, si la estancia no presentaba ventanas o huecos para eliminar el exceso de vapor de agua acumulado en la sala, se procedía a su eliminación bien mediante difusión a través de los muros, convección a través de huecos y rendijas o, por absorción del vapor en los materiales que posteriormente se cedía al ambiente cuando este se secaba.

Una vez planteada la concepción técnica del planteamiento de los sistemas de cerramiento de las edificaciones históricas, se debe analizar las posibles causas que generan la formación de humedades, dado que es el motivo principal de la redacción del presente estudio. La presencia de humedad puede ser debida a procesos de filtración por contacto directo con el agua o por capilaridad. En ambos casos, la transferencia de agua a través de la mampostería puede llevar consigo el arrastre de sales solubles, bien pertenecientes a la propia roca o, bien procedentes de la propia agua de infiltración. Dichas sales solubles pueden quedar retenidas en los cerramientos cuando el agua se evapora, cristalizando en los poros y provocando la aparición de eflorescencias (Giovannacci et al, 2017). La saturación de los poros por la presencia de cristalización de sales disminuye los procesos de evaporación y provoca un desplazamiento de las manchas de humedad debido a la búsqueda de nuevas zonas de salida del vapor de agua presente en los materiales porosos.

Por otro lado, si la acumulación de sales comentada anteriormente se correspondiera con sales higroscópicas, estas tenderían a retener el agua del aire cuando la humedad relativa superara un cierto valor límite, lo que podría generar un falso mecanismo de presencia de humedades por condensación higroscópica, con posible aparición de manchas, pero provocadas simplemente por la propia absorción del vapor de agua del aire por efecto de la higroscopicidad de las sales y no por la presencia real de una fuente de agua por filtración o capilaridad. Por este motivo, una causa general de patología por humedades en edificios históricos es la aparición de eflorescencias debidas a fenómenos locales de filtración ocasionado años atrás que posteriormente se han reactivado. Es decir, la aparición de nuevas humedades sobre la mampostería no sería debida a la presencia real de una nueva filtración de agua, sino por la higroscopicidad de las sales en la superficie de las rocas. Grossi y Esbert (Grossi y Esbert, 1994) muestran una profunda revisión bibliográfica sobre los efectos de las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. En este sentido, en el interior de la iglesia analizada se observan diferentes eflorescencias y manchas que hacen intuir la existencia de filtraciones, Figura 2.

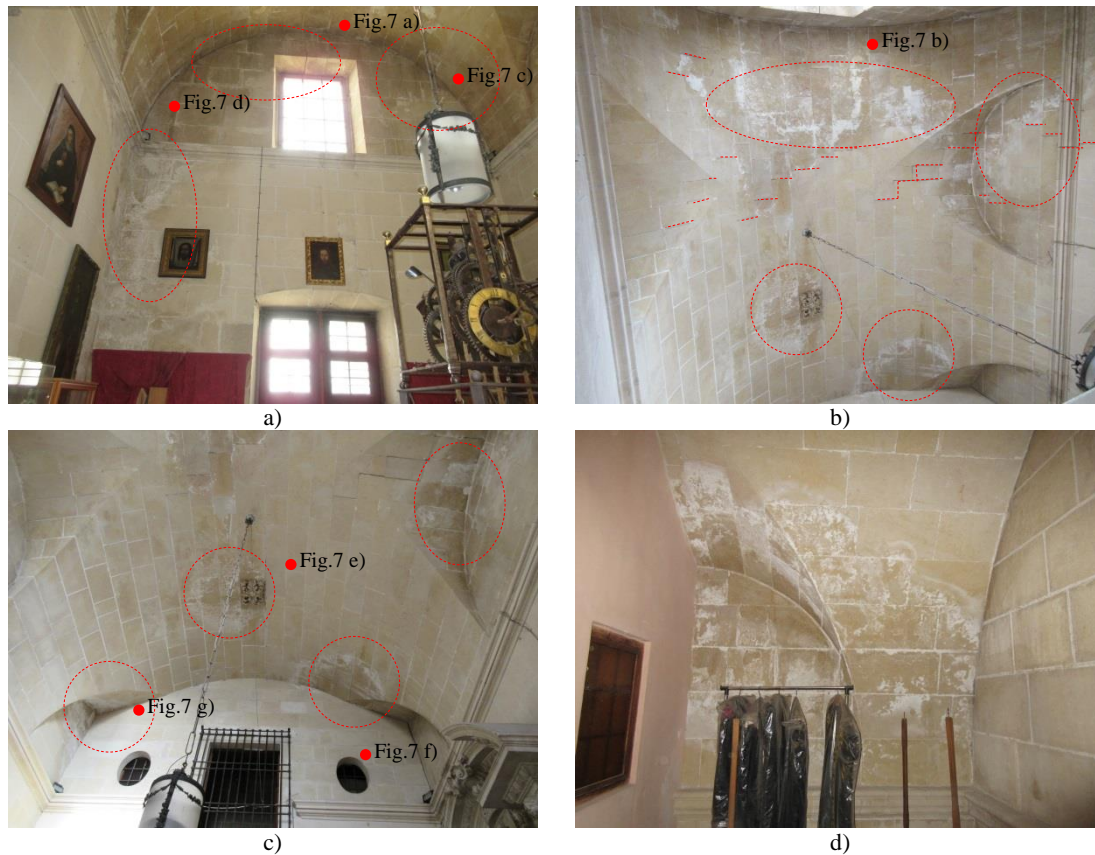


Figura 2. Fotos de salas bajo cubierta 2: a) Fachada Este, b) Vista inferior de la cubierta, c) Vista inferior de cubierta con tabique divisorio de bóveda, d) Sala anexa superior tras división con tabique. Fotos de salas bajo cubierta 1: e) Vista inferior de la cubierta zona próxima a fachada exterior, f) Vista inferior de la cubierta en contacto con el cuerpo de la iglesia. Figuras a), b), c) y d) incluyen los puntos de tomografía de la Figura 7 con puntos rojos.

2. PROCEDIMIENTO

Se ha realizado un análisis visual comparativo, a partir de la realización de una prueba de estanquidad, analizando el estado de las salas antes y después del proceso de inundación de las cubiertas, con el objeto de detectar filtraciones de rápido acceso desde la cubierta. Finalmente, se ha realizado un análisis a partir de termografía infrarroja tanto de la cubierta como de las salas citadas, a fin de detectar la existencia de puentes térmicos localizados y zonas de presencia significativa de humedad (Takeda, 2018), (Silva et al, 2019).

Con el objeto de determinar las condiciones generales de funcionamiento de la cubierta en relación a las pendientes, el estado del soporte de impermeabilización, así como el estado de ejecución de los elementos singulares, tales como bordes, encuentros, desagües y juntas, se ha planteado la realización de una prueba de estanquidad a fin de observar la aparición o no de humedades bajo la cubierta o en los muros, prestando atención a los puntos críticos asociados con detalles constructivos según la normativa en vigor a fecha de impermeabilización de la cubierta (NBE QB-90). La realización de la prueba de estanquidad consistió en la inundación hasta un nivel aproximadamente entre 3-7 cm por encima de la cota de desagüe, asegurando un nivel de sobrecarga suficientemente bajo para no afectar a las condiciones de seguridad estructural de la cubierta. La inundación se mantuvo durante 72h, estando los desagües obturados mediante un

sistema de impermeabilización plástica a fin de evitar el descenso del nivel de agua sobre la cubierta. Finalmente, una vez transcurrido el tiempo requerido para la prueba de estanquidad, se procedió a la eliminación de los sistemas de obturación de los desagües para mantener el actual funcionamiento de los mismos.

Por otro lado, con el objeto de determinar la presencia de humedades y posibles puentes térmicos, que evidencian un funcionamiento incorrecto de la cubierta se procedió a la realización de una prueba mediante cámara termográfica modelo FLIR E30, en base a las disposiciones de la norma EN 13187:1998. Algunos ejemplos recientemente publicados de aplicación de dicha técnica los podemos encontrar en las siguientes referencias (Vijay et al, 2019), (Valluzzi et al, 2019), (Lucchi, 2018), (Ruiz Valero, et al, 2019), (Garrido et al, 2020), (Martínez-Garrido et al, 2018), (Zhang et al, 2018), (Barreira et al, 2020) y (Barbosa et al, 2021)).

La prueba se realizó durante dos días consecutivos. Durante el primer día, se procedió al registro térmico de las cubiertas 1 y 2, así como de la estancia bajo la sala 2. Dicho registro se realizó entre las 19:45 y las 20:45. Los valores máximos y mínimos oscilaron a lo largo del día entre 10.7 °C y 17.4 °C, registrándose un valor a la hora de la toma de datos de 15 °C en el exterior, y de 16.7°C, siendo la humedad relativa de valor comprendido entre 38-40%. Por otro lado, para los datos registrados el segundo día, 15 de enero, los valores máximos y mínimos de la temperatura alcanza valores entre los 16.6 °C y los 8.7 °C., registrándose un valor a la hora de la toma de datos de 13°C en el exterior, y de 15.9 °C, siendo la humedad relativa de valor comprendido entre 52%. Durante este segundo día, se analizaron las salas debajo la cubierta 1, así como el edificio anexo a la sala bajo la cubierta 2. La prueba consistió en analizar los puntos críticos detectados durante las fases de inspección visual, a fin de corroborar los resultados de forma experimental. En relación a la superficie, se consideró un material granular con valor de emisividad 0.95 en base a la biblioteca de materiales proporcionada por el fabricante, homogéneo para todas las superficies analizadas. Otros ejemplos publicados relacionados con la emisividad de este tipo de materiales los podemos encontrar en (Barreira et al, 2021).

3. RESULTADOS

En relación al análisis del flujo de agua durante la prueba de estanquidad, los resultados muestran como para el caso de la cubierta 1, la zona superior canaliza perimetralmente el agua hacia el canalón a través de las pendientes establecidas. Para el caso de la cubierta 1, en la zona inferior, se ha podido verificar que las pendientes confluyen en la zona del desagüe. La ausencia de rebosaderos evita la evacuación de las aguas en caso de saturación del desagüe por acumulación de elementos sólidos en entrada del mismo. Este hecho facilita que el nivel de agua estancada alcance el muro lateral de la capilla de la Comuni3n, favoreciendo la entrada de agua en la intersecci3n fald3n-paramento vertical.

En relaci3n a los resultados del an3lisis termogr3fico de la cubierta 1, en la Figura 3 se muestran las im3genes tanto para la zona superior como inferior de la misma. En la Figura 3 (a) se puede observar, una visi3n general de la parte superior de la misma. En dicha imagen, se puede identificar todas las posibles manifestaciones patol3gicas anteriormente comentadas. En primer lugar, se observa como tras la realizaci3n de la prueba de estanquidad y el vertido del agua sobre parte de los cerramientos de la fachada vertical y transcurridas 10 h desde la realizaci3n de la misma, se conserva parte de la humedad debido a la elevada capacidad de absorci3n de la piedra en el paramento. En dicha imagen, tambi3n puede observarse como la zona del antepecho, el agua se ha acumulado m3s que en la zona situada justo en la zona del canal3n. Un detalle de dicha zona puede observarse en la Figura 3(c), donde se observa no solamente la entrada y la acumulaci3n de agua en la zona inferior, sino tambi3n, el agua filtrada a trav3s de las juntas entre las piezas de mampostería. Por otro lado, tambi3n se debe destacar el cambio brusco de característic3s térmicas

en la unión entre el antepecho, y la pared correspondiente a la protección rígida del faldón superior, Figura 3(a)-(c). Se observa claramente la junta entre los dos materiales y se puede comprobar como parte del agua vertida por el extremo del faldón ha chorreado por el paramento, almacenándose en la zona de la junta, debido a la ausencia de la realización correcta del detalle del extremo del faldón. En relación al canalón, sin embargo, no se han detectado problemas de filtraciones. Por otro lado, en la Figura 3(b), se observa un detalle del canalón para el paso de las instalaciones. En dicha imagen, se puede observar en verde, la zona trasera del canalón, donde se ha producido el almacenamiento de agua, debido a la falta de estanquidad de la junta y la ausencia de un dispositivo de protección para evitar el chorreo del agua por el paramento y el filtrado por detrás del canalón. Por otro lado, en la Figura 3 (d), se muestra un detalle de la falta de estanquidad del extremo derecho del antepecho, en la zona de conexión del extremo del faldón, el antepecho y el contrafuerte, marcándose la zona que actualmente está muy deteriorada, siendo una muestra evidente de falta de impermeabilización. En relación también con problemas de estanquidad, se puede ver en la Figura 3 (e), la ausencia de la entrega de la impermeabilización en la zona de contacto del faldón inferior con el antepecho, así como la presencia de vegetación en la zona más a la derecha de la foto, de mayor temperatura. Además, a través de dicha imagen se puede evaluar el estado actual de impermeabilización de la zona dañada de la solera. Los resultados mostrados por la termografía no mostraron la presencia de problemas de estanquidad. Finalmente, las figuras 3 (g-h), muestran la zona embalsada durante la prueba, donde puede observarse claramente el proceso de ascensión capilar a través del paramento, superando claramente los 5 cm de banda de impermeabilización dispuesta actualmente en el empalme del faldón con el paramento vertical, en las zonas donde se ha puesto, pues existe la ausencia de dicho detalle constructivo en diversas partes del faldón inferior.

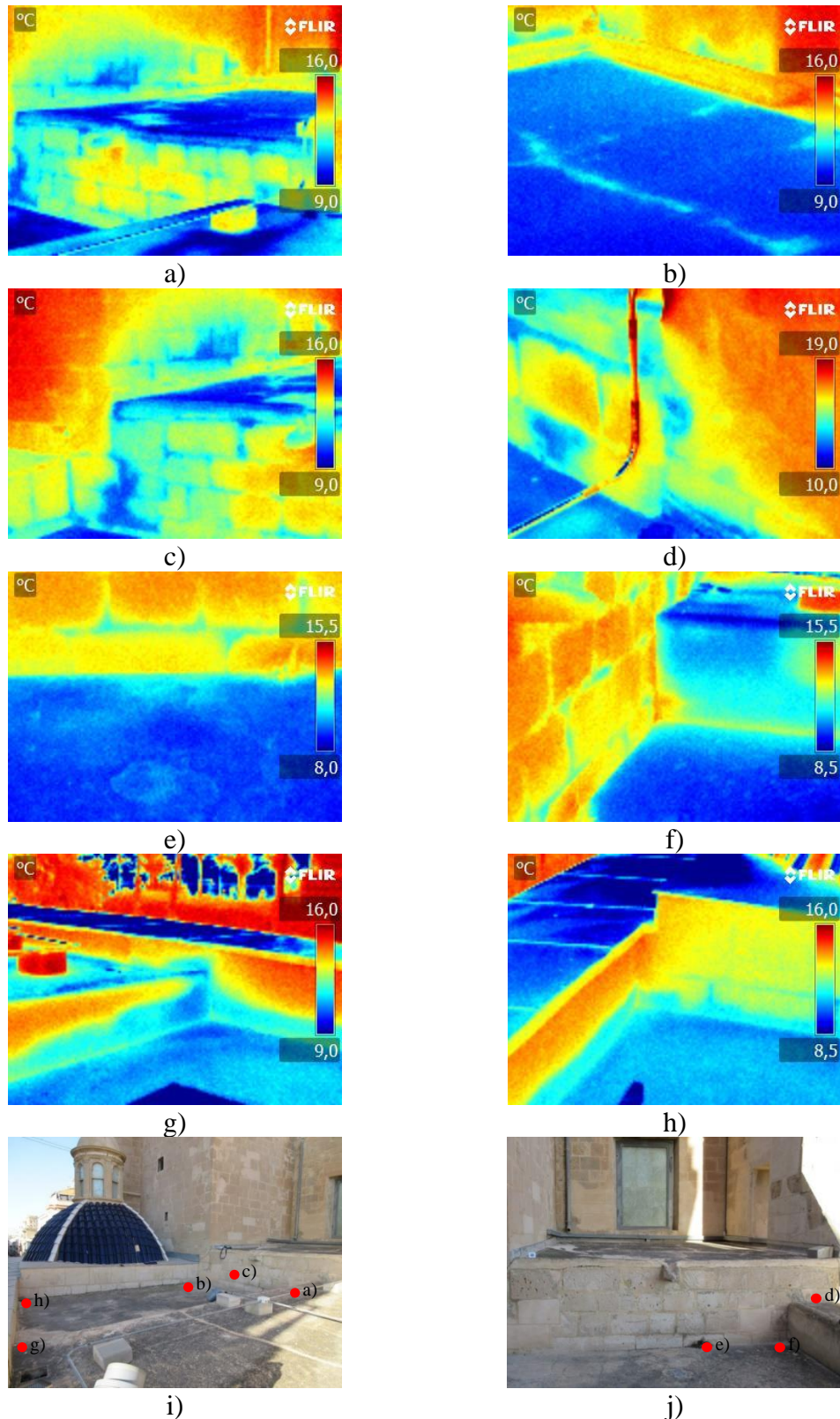


Figura 3. Termografía cubierta 1: a) Vista general zona superior, b) Detalle de canaleta de instalaciones, c) Humedades en paramento vertical y esquina de antepecho, filtración por juntas de mampostería, d) Falta de estanquidad en antepecho y contrafuerte, e) Faldón inferior y paramento vertical, f) Conexión lateral faldón antepecho, g) y h) Capilaridad, i) y j) localización de las termografías.

En relación a los resultados del análisis de la cubierta 2, la Figura 4 (a) y 4 (b), muestran el detalle de la ausencia de la junta perimetral, viéndose la diferencia de temperaturas en las zonas donde el mortero está totalmente deteriorado y la junta queda a hueso entre el extremo del faldón y el paramento. Es importante no confundir con la línea roja asociada al paso de una tubería de instalaciones, pues la zona analizada es la asociada al extremo de conexión con el paramento vertical de la fachada. En dichas imágenes se puede ver la falta de aislamiento térmico en los tramos del paramento vertical, así como zonas de tonalidad más fría, debido al agua vertida durante la prueba de carga. Las figuras 4(c) y 4(d) muestran un detalle de dicha zona sin aplicación de cámara térmica. Por otro lado, la Figura 4(e) muestra la zona del extremo del faldón lateral. En dicha imagen se puede ver como la falta de aislamiento térmico en los tramos del paramento vertical, así como zonas de tonalidad más fría, debido al agua vertida durante la prueba de carga. Esta zona se muestra en tonalidad más verdosa en la zona intermedia de la foto. También debe destacarse el contraste en la unión del extremo del faldón, viéndose claramente la posición de la junta horizontal entre el material superior y el material de apoyo. Dicha junta, representada como una línea de color amarillo con tonos cian, presenta un estado de deterioro importante, tal y como se pudo observar durante el análisis visual de la cubierta, Figura 4 (g). Finalmente, la Figura 4 (f) muestra un detalle de extremo perimetral del faldón, en la zona próxima a la puerta de acceso a la cubierta. En la Figura 4 se incluyen también las imágenes con cámara digital de las zonas analizadas mediante imagen térmica. La comparativa entre sí de dichas imágenes permiten observar los beneficios del uso de la termografía en la detección de patologías, siendo esta una técnica de apoyo a la inspección visual.

Por otro lado, en las Figuras 5, 6 y 7, se muestran los detalles de la distribución de temperaturas en el interior de las tres salas interiores analizadas. Debe destacarse que debido a los bajos niveles de diferencias térmicas entre los diferentes elementos estructurales que constituyen el cerramiento, la nitidez de las imágenes no muestra un comportamiento tan diferenciado como para el caso del análisis de las cubiertas. A fin de aumentar el contraste térmico, en algunas salas se mantuvo encendidas los focos previos a la realización de la prueba, para poder asegurar la posición de las aristas de la sala, una vez tomadas las fotos térmicas, ya que estas se realizaron con la luz apagada. Analizando el comportamiento térmico de la sala bajo la zona inferior de la cubierta 1, Figura 5, denominada a lo largo del estudio como la sala adyacente a la capilla de la Comunión, se puede observar como en la Figura 5 (a), correspondiente a la esquina de conexión entre la fachada exterior y el arco toral que da acceso a la capilla de la Comunión y, dispuesto en la zona próxima a la presencia del sumidero en la cubierta por su parte superior, que queda claramente definida la diferencia térmica entre la parte correspondiente a la fachada y el techo de la bóveda. Sin embargo, con las condiciones climáticas registradas durante la realización del ensayo, no se han detectado la presencia de irregularidades térmicas específicas en las zonas potencialmente dañadas asociadas a la conexión entre la fachada y el arco toral de la bóveda de arista analizada. Asimismo, se observa parte de la ventana exterior, la cual nos sirve de referencia a fin de poder encuadrar la foto. En la Figura 5(b), se muestra un detalle de la zona de ventana. En dicha imagen es claramente observable el efecto de punto frío debido a la mayor transparencia térmica del vidrio frente a los elevados espesores de la fachada. Además, se puede observar la falta de aislamiento térmico en las zonas de conexión entre la fachada y la cubierta, marcándose claramente la arista de unión entre ambas, y mostrándose un gradiente de temperatura desde el inicio hasta la zona central de la bóveda. En la Figura 5(c), se muestra la termografía de la otra esquina de la fachada exterior, de forma similar a lo descrito para la figura 5 (a). Como puede observarse, en esta imagen no se aprecian signos relevantes de patología, siendo detectados únicamente el salto térmico entre los paramentos verticales y la cubierta de la bóveda. Finalmente, en la Figura 5 (d) se muestra una imagen general de la cubierta. En dicha imagen puede observarse la presencia de una parte de la cubierta ligeramente más fría que la otra, debida principalmente al efecto de la acumulación de agua durante

la realización del ensayo.

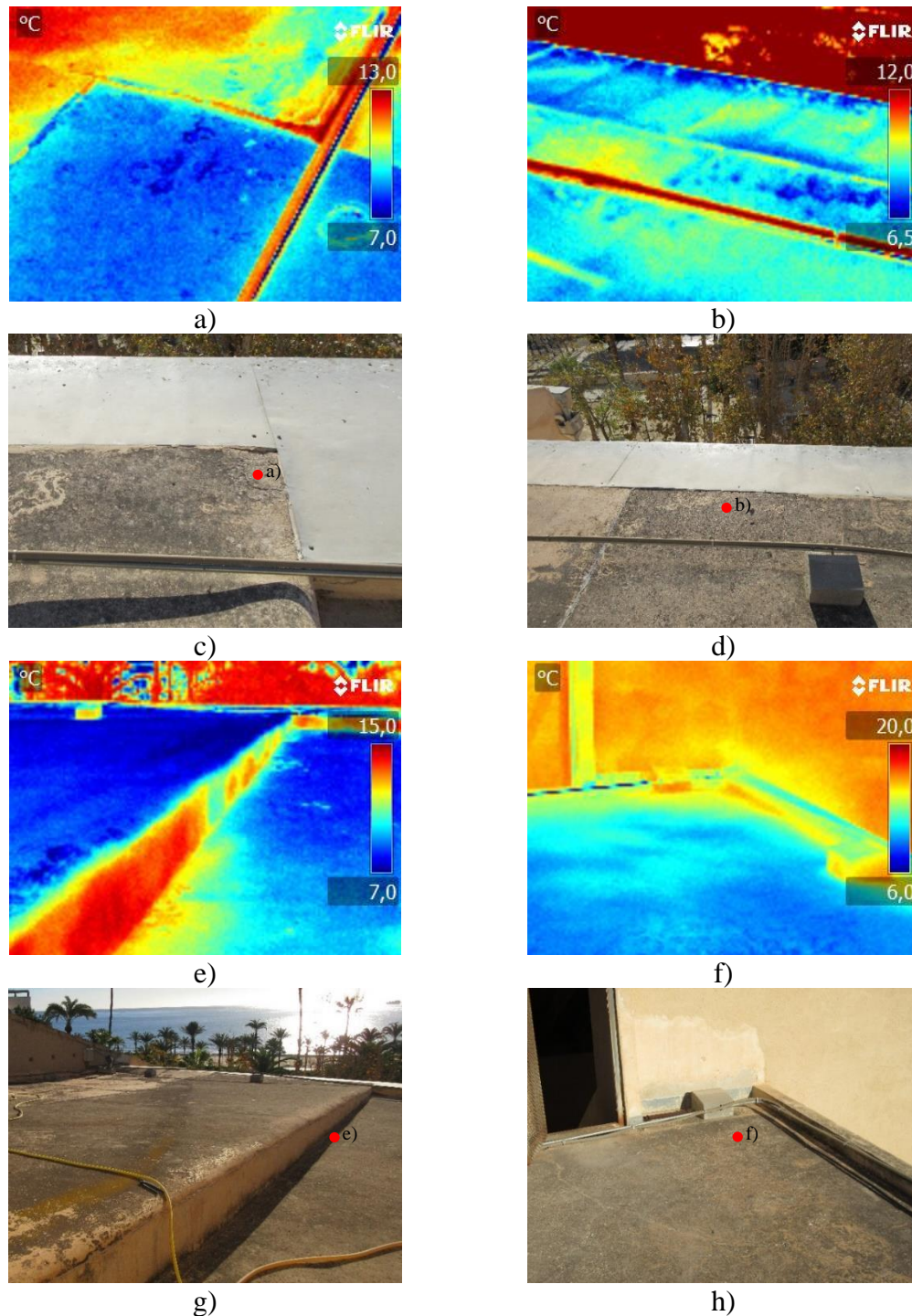


Figura 4. Termografía cubierta 2: a) Deterioro de junta perimetral, b) Detalle de fallo en junta perimetral en contacto del faldón con la fachada, c) y d) Imagen a) y b) con cámara digital, e) Detalle del extremo lateral del faldón y conexión con cubierta, f) Zona perimetral del faldón en zona de acceso a la cubierta; g) y h) Imagen e) y f) con cámara digital.

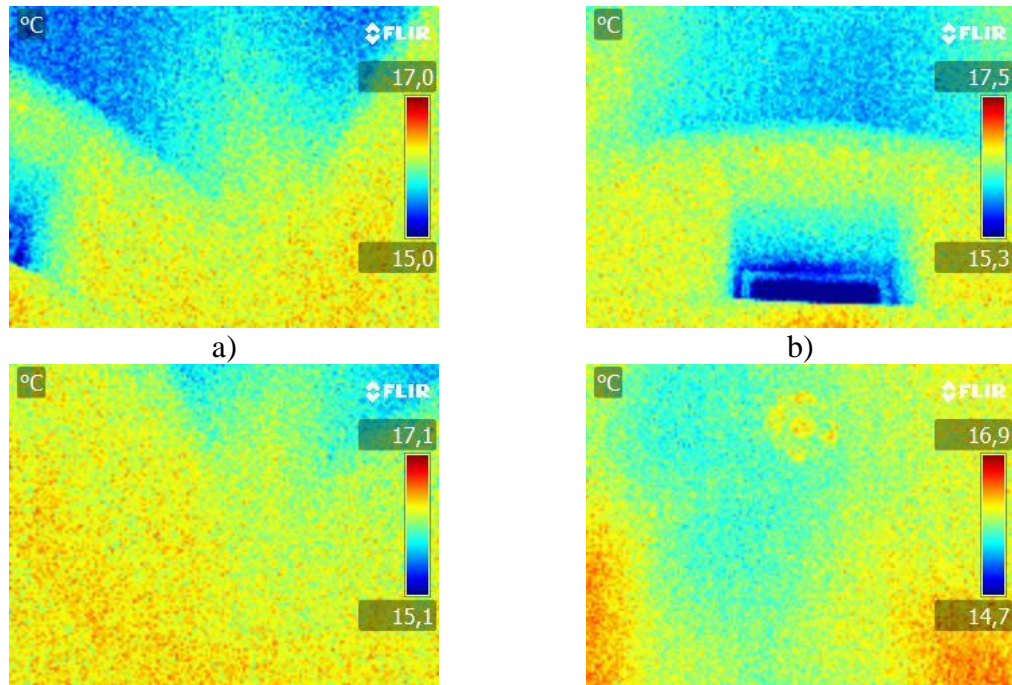


Figura 5. Termografía salas bajo cubierta 1, adyacente a la capilla de la Comunión: a) Conexión del arco toral con la fachada exterior, en zona de acceso a la capilla de la Comunión, b) Conexión fachada con cubierta en zona de ventana, c) Segunda esquina del muro de fachada, equivalente a la imagen (b), d) Vista general del a cubierta desde abajo.

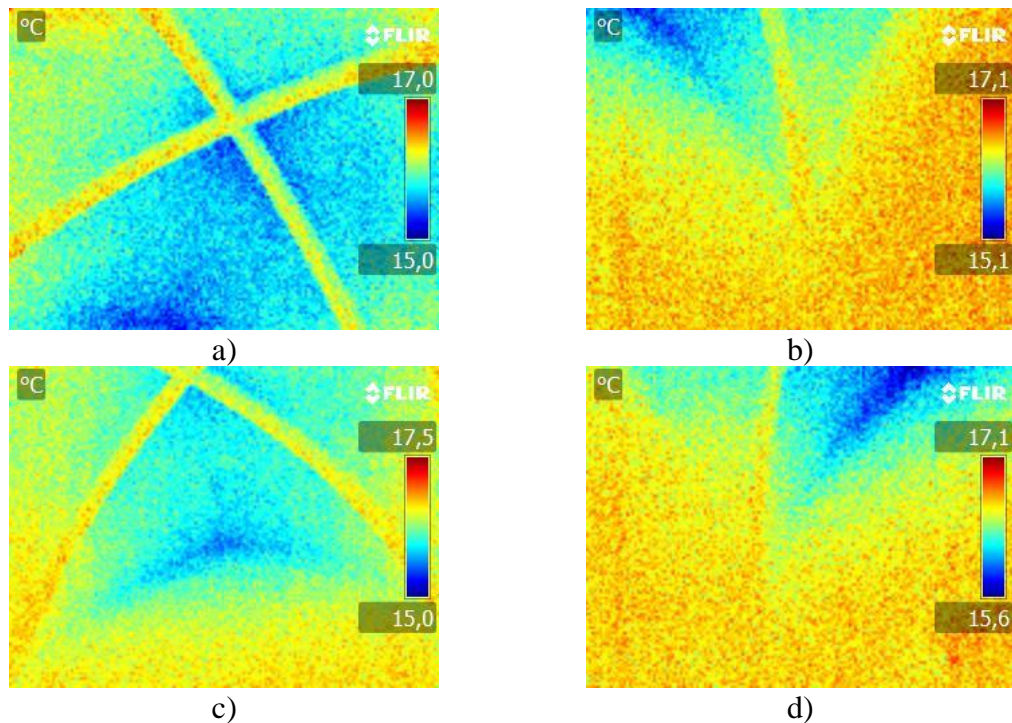


Figura 5. Termografía salas bajo cubierta 1, adyacente a la nave lateral: a) Vista general de cubierta, b) Conexión fachada con esquina lateral, c) Conexión fachada con cubierta, d) Conexión fachada con esquina lateral opuesta.

En relación al análisis por termografía realizada para la sala dispuesta en la nave lateral, adyacente a la nave central de la basílica, en la Figura 6 se muestra la distribución de las temperaturas en los diferentes puntos críticos analizados en los apartados anteriores. En primer lugar, en la Figura 6 (a), se muestra una vista inferior de la cubierta de la bóveda de arista. Puede observarse la diferencia de temperaturas entre los arcos perpiños y el resto de la plementería que conforma el techo de la bóveda. Por otro lado, en la Figura 6 (b) y 6 (d), se muestran la termografía de detalle de las esquinas de conexión entre los arcos perpiños, y los muros de fachada. Se observa un patrón de comportamiento similar a los descritos para la sala anterior, con la diferencia de la mayor temperatura del arranque de los arcos. Debe destacarse que el análisis de dichos puntos se ha realizado sin la presencia de fuentes de luz próximas ni antes ni durante la prueba, por lo que la distribución térmica es la debida al equilibrio higrotérmico entre el exterior y el interior del edificio. Finalmente, la Figura 5 (c), muestra el mismo problema de falta de aislamiento que el comentado en la sala anterior, debido a la junta de conexión entre el paramento vertical y la cubierta.

Finalmente, en relación al análisis por termografía realizada para la sala dispuesta bajo la cubierta 2, en la Figura 7 se muestra la distribución de las temperaturas en los diferentes puntos críticos analizados en los apartados anteriores. De forma general, el comportamiento térmico es muy similar a los detectados en las salas anteriores, con la salvedad de que en este caso no se ha observado una diferencia térmica tan elevada entre los puntos de la fachada interior y la cubierta. Es decir, en las Figuras 7 (a), (b), (c) y (d) se observa el detalle del contacto entre la fachada y la cubierta, observándose las filtraciones térmicas en la parte superior de la zona de la ventana, así como en la propia ventana. En la Figura 7 (e) se muestra una termografía de la parte de la cubierta correspondiente al anclaje del candelabro, donde se observa una distribución uniforme de temperaturas sin presencia de daños detectados. En las Figuras 7 (f) y (g), se observan las termografías asociadas a las figuras 7(c) y (d), pero en este caso, en la fachada opuesta a la exterior. En este caso, puede observarse las variaciones térmicas en las zonas afectadas por el calentamiento de los focos. Esto es debido a la presencia de puntos fríos en las zonas de contacto entre la pared lateral y la fachada. Dichos puntos fríos, especialmente los detectados en la Figura 7(g), están relacionados con las manchas de humedad detectadas. En dichas imágenes se muestra el agujero circular, más frío, a modo de referencia para ubicar la posición de las fotos. Es importante destacar que dichas manchas de humedad, además de estar relacionadas con la presencia de una zona fría, también están relacionadas con la presencia de una zona de acumulación de agua en la parte superior de la cubierta 2, próxima a la cúpula. En dicha zona se produce el vertido del agua recogida en la cúpula, y la falta de estanquidad lateral en el extremo del faldón, junto con el bajo nivel de ventilación presentado en la sala mostrada, provocan el aumento de la humedad, y con ello la aparición de dichas eflorescencias.

Finalmente, se debe destacar la presencia de una gotera detectada en el edificio anexo de acceso a la sala 2. Dicha gotera se presenta en el techo de la planta superior. No se ha podido detectar si la presencia de la humedad es debido a un error en la cubierta de teja, o en la propia cubierta 2. Sin embargo, por su posición geométrica está muy próxima a la posición del desagua de la cubierta, pudiendo ser un signo de falta de estanquidad del mismo.

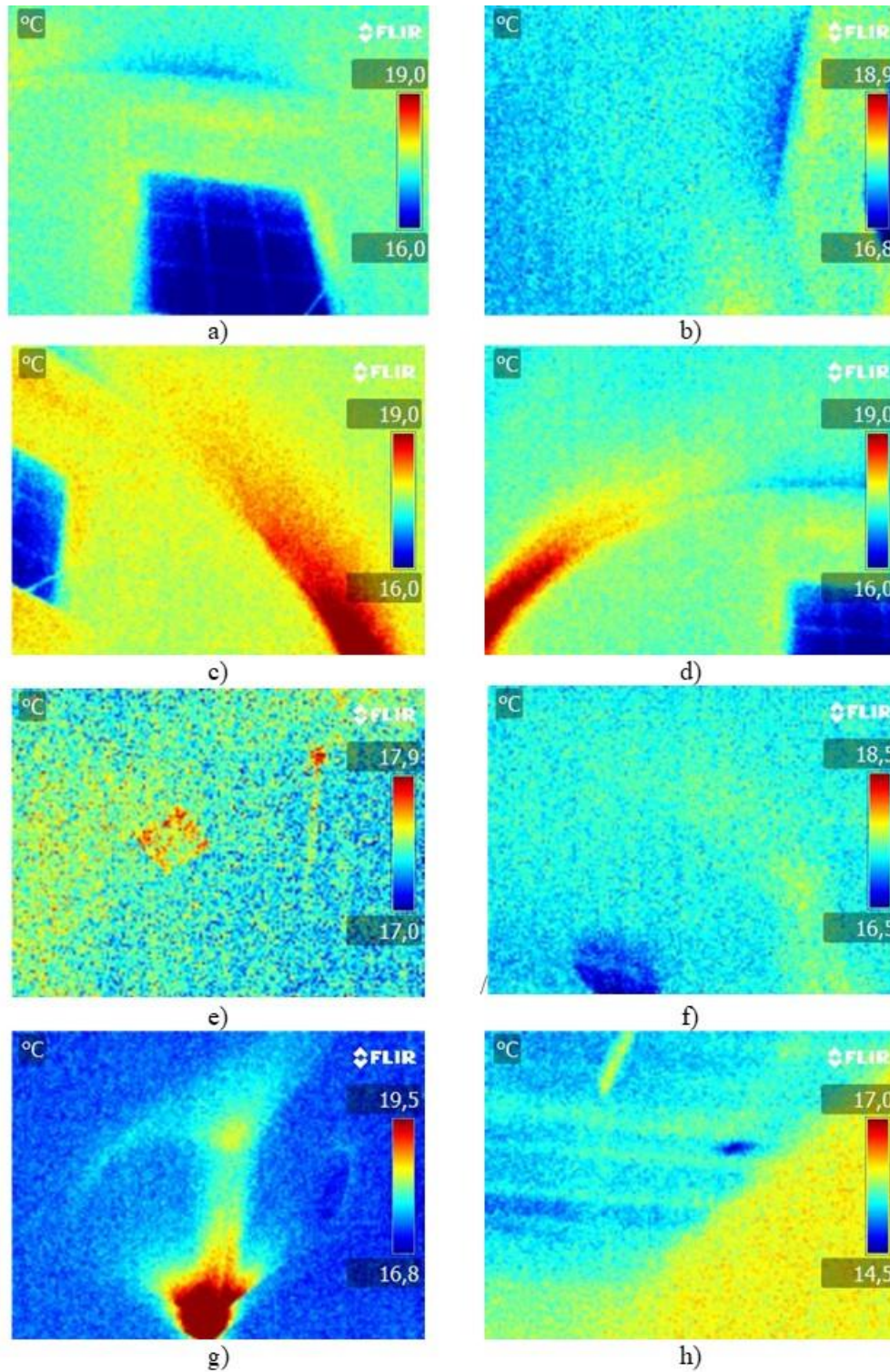


Figura 7. Termografía sala bajo cubierta 2: a) zona de ventana y forjado, b) Vista inferior de la cubierta, c) Vista conexión paramento lateral forjado, d) Vista conexión paramento lateral forjado, e) zona central de cubierta, f) Vista de muro divisorio trasero, g) Vista conexión paramento lateral y muro trasero, h) Gotera en zona de edificio anexo.

4. CONCLUSIONES

Tras la realización del estudio de valoración técnica del estado de estanquidad y el análisis de humedades de las cubiertas analizadas en la basílica de Santa María, se puede concluir que el estado actual de la cubierta no cumple las condiciones mínimas técnicas en base al estado actual de los detalles constructivos según lo dispuesto en la normativa (NBE QB-90). Asimismo, el estado de humedades y eflorescencias presentes en las zonas interiores es debido a un problema de condensación higroscópica, a causa de los aumentos de humedad por la proximidad a la zona marítima, así como la falta de ventilación de las salas interiores estudiadas. Además, esta patología se ve intensificada por los posibles problemas de filtración ocasionados durante los meses de octubre y noviembre, debido al mayor nivel de lluvias. Estas aguas se acumulan en el interior de los elementos constructivos y van eliminando el exceso de humedad por transmisión de vapor al variar las condiciones térmicas del edificio. Además, la presencia de sales marinas en edificios próximos y la elevada capacidad de absorción de los materiales estudiados, muestran un comportamiento propenso al arrastre de sales en disolución durante las épocas de lluvia que, favorece la aparición de eflorescencias, las cuales aumentan el riesgo de humedades por condensación. Por otro lado, en relación al empleo de las técnicas de análisis mediante termografía, las imágenes han permitido detallar con mayor precisión las patologías existentes, especialmente las debidas a las fugas térmicas y las zonas de acumulación de humedad, las cuales son imperceptibles durante la exploración visual. Este hecho pone de manifiesto la viabilidad del uso de la termografía para identificar patologías en edificios de mampostería que podrían estar ocultas por recubrimientos o condiciones geométricas que impidan su detección a simple vista. Además, mediante el uso de esta técnica es posible acotar de forma más precisa las superficies de reparación desde el punto de vista de una futura intervención en comparación con un análisis visual directo sin termografía tal y como comenta Barbosa (Barbosa et al, 2021).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Obispado de Orihuela-Alicante la disponibilidad para realizar este estudio en un bien catalogado.

6. REFERENCIAS

- Barbosa, M.T.G., Rosse, V. J., Laurindo, N. G. (2021), “*Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades*”, Journal of Building Engineering, 43, art. no. 102555, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102555>
- Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Simões, M.L., Rebelo, D. (2020), “*Quantitative infrared thermography to evaluate the humidification of lightweight concrete*”, Sensors (Switzerland), 20 (6), art. no. 1664, DOI: <https://doi.org/10.3390/s20061664>
- Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Simões, M.L. (2021), “*Emissivity of building materials for infrared measurements*”, Sensors, 21 (6), art. no. 1961, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21061961>
- Bevià García, M., Azuar Ruiz, R. (2005), “*Santa María descubierta: Arqueología, arquitectura-cerámica: Excavaciones en la Iglesia de Santa María de Alicante (1997-1998)*”. Alicante. Fundación MARQ. ISBN: 84-609-7478-2

Brotóns, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcón, J.C. (2013), “*Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite*”. *Engineering Geology*, 167, pp. 117-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.012>

Giovannacci, D., Brissaud, D., Mertz, J.-D., Mouhoubi, K., Bodnar, J.-L. (2017), “*Nonintrusive tools to detect salts contamination in masonry: Case study of Fontaine-Chaalis church*”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10331, art. no. 1033103. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2269727>

Grossi, C. M. Esbert, R. M. (1994), “*Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica*”. *Materiales de Construcción*, Vol. 44, nº 235. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.1994.v44.i235.579>

Louis, M., García del Cura, M. A., Spairani, Y., de Blas. D. (2001), “*The Civil Palaces in Gravina Street, Alicante: building stones and salt weathering*”. *Materiales de Construcción*, Vol. 51, nº262. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i262.369>

Lucchi, E. (2018), “*Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 3077-3090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>

Paricio Ansuateguie, I. “*La construcción de la Arquitectura. Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya*”, 1985, T.2, p. 26. ISBN: 978-84-7853-375-6

Norma Básica de la Edificación. Cubiertas con materiales bituminosos: “*NBE QB-90*”. Gobierno de España.

Ruiz Valero, L., Flores Sasso, V., Prieto Vicioso, E. (2019), “*In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques*”, *Case Studies in Construction Materials*, 10, art. no. e00228, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00228>

Silva, G. P., Batista, P. I. B., Povóas, Y. V. (2019), “*Uso de termografía infrarroja para estudiar el desempeño térmico de paredes: una revisión bibliográfica*”, *Revista ALCONPAT*, 9(2), pp. 117 – 129, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.341>

Takeda, T. Mazer, W. (2018), “*Potencial da análise termográfica para avaliar manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas*”, *Revista ALCONPAT*, 8 (1), pp. 38 – 50, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.181>

Valluzzi, M.R., Lorenzoni, F., Deiana, R., Taffarel, S., Modena, C. (2019), “*Non-destructive investigations for structural qualification of the Sarno Baths, Pompeii*”, *Journal of Cultural Heritage*, 40, pp. 280-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.015>

Vijay, P.V., Tulasi Gadde, K., Gangarao, H.V.S. (2019), “*Structural Evaluation and Rehabilitation of Century-Old Masonry and Timber Buildings*”, *Journal of Architectural Engineering*, 25 (2), art. no. 05019001, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000350)

Garrido, I., Solla, M., Lagüela, S., Fernández, N. (2020), “*Irt and gpr techniques for moisture detection and characterisation in buildings*”, *Sensors (Switzerland)*, 20 (22), art. no. 6421, pp. 1-38. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20226421>







Martínez-Garrido, M.I., Fort, R., Gómez-Heras, M., Valles-Iriso, J., Varas-Muriel, M.J. (2018), “*A comprehensive study for moisture control in cultural heritage using non-destructive techniques*”, *Journal of Applied Geophysics*, 155, pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.008>

Zhang, F., Zhang, X., Li, Y., Tao, Z., Liu, W., He, M. (2018), “*Quantitative description theory of water migration in rock sites based on infrared radiation temperature*”, Engineering Geology, 241, pp. 64-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.006>

Thomas, c., Lombillo, I., Setién, J., Polanco, J. A., Villegas, L. (2008), “*Absorción por capilaridad y consolidación de materiales pétreos del patrimonio histórico construido impermeabilizados y reforzados con productos hidrofugantes y consolidantes comerciales*”. Tecnología de la rehabilitación y la gestión del patrimonio construido (REHABEND). ISBN: 978-84-692-5650-3.

UNE EN 13187 (1998). “*Prestaciones térmicas de edificios. Detección cualitativa de irregularidades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos*”. Asociación Española de Normalización.

30 años de investigaciones sobre concreto con caucho (1990-2020). Un análisis bibliométrico

Z. Zarhri^{1*} , W. Rosado Martínez² , J. Dominguez Lepe² , R. E. Vega-Azamar² , M. Chan Juárez² , B. Pamplona Solis² 

*Autor de Contacto: z.zarhri@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.554>

Recepción: 31/08/2021 | Aceptación: 09/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio bibliométrico de la literatura sobre el uso del caucho reciclado de las llantas en la industria de la construcción para promover el interés de utilizarlo como materia prima para reducir la contaminación a nivel global. Se consideraron los trabajos publicados en el período 1990-2020, tanto en las bases de datos de Scopus como de Web of Science (WoS), se utilizó el Methodi Ordinatio y el software VOSviewer para llevar a cabo el análisis. En este período de tiempo, se ha publicado un total de 967 documentos sobre el uso del caucho en concretos estructurales y no estructurales con la contribución 1182 autores en el tema. Desde 2010, ha aumentado notablemente el interés de los investigadores por introducir el caucho reciclado en aplicaciones constructivas. China, Estados Unidos y Australia son los países líderes en la investigación del concreto con caucho reciclado proveniente de los neumáticos.

Palabras clave: concreto con caucho reciclado; construcción; polvo de neumático; análisis bibliométrico; *Methodi Ordinatio*.

Citar como: Zarhri, Z., Rosado Martínez, W., Dominguez Lepe, J., Vega Azamar, R. E., Chan Juárez, M., Pamplona Solis, B. (2022), “30 años de investigaciones sobre concreto con caucho (1990-2020). Un análisis bibliométrico”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 127 – 142, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.554>

¹ CONACYT-Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal; Insurgentes 330, C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, Mexico

² Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal; Insurgentes 330, C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, Mexico.

Contribución de cada autor

En este trabajo, William Rosado Martínez realizó los estudios bibliométricos y contribuyó a la discusión y redacción del manuscrito (30%). Zakaryaa Zarhri supervisó todo el trabajo y escribió el documento en inglés (30%). José Antonio Domínguez Lepe (10%), Ricardo Enrique Vega Azamar (10%) y Maritza Chan Juárez (10%) contribuyeron a la discusión de los resultados y la corrección del manuscrito. Blandy Berenice Pamplona Solis contribuye a la metodología y resultados del documento (10%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

30 years of rubberized concrete investigations (1990-2020). A bibliometric analysis

ABSTRACT

This work presents a bibliometric study of the literature on the use of recycled rubber from tires in the construction industry to promote its use as a 'raw' material to reduce pollution at a global level. Published papers between 1990 and 2020 in both databases Scopus and Web of Science (WoS) were taken into account using the Methodi Ordinatio and the VOSviewer software. A total of 967 documents on the use of recycled rubber in structural and non-structural concrete have been published during this time frame and 1182 authors have contributed on the subject. Since 2010, the interest of researchers to introduce recycled rubber in construction applications has increased markedly. China, the United States of America and Australia are the leading countries in rubberized concrete research.

Keywords: rubberized concrete; construction; crumb rubber; bibliometric analysis; *Methodi Ordinatio*.

30 anos de investigações sobre concreto com adição de borracha (1990-2020). Uma análise bibliométrica

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo bibliométrico da literatura sobre o uso de borracha reciclada de pneus na indústria da construção para promover seu uso como matéria-prima para reduzir a poluição em nível global. Artigos publicados entre 1990 e 2020 em ambas as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) foram levados em consideração usando o Methodi Ordinatio e o software VOSviewer. Nesse período, foram publicados 967 documentos sobre o uso de borracha reciclada em concreto estrutural e não estrutural e 1182 autores contribuíram com o assunto. Desde 2010, o interesse dos pesquisadores em introduzir borracha reciclada em aplicações de construção aumentou significativamente. China, Estados Unidos da América e Austrália são os países líderes na pesquisa de concreto com adição de borracha.

Palavras-chave: concreto com adição de borracha; construção; borracha fragmentada; análise bibliométrica; *Methodi Ordinatio*.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado y eliminación de los residuos sólidos es una de las actividades que más afecta al medio ambiente. De acuerdo con el Banco Mundial, en su informe de 2018 “*What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*” se espera un aumento en la generación de desechos de hasta un 70% para 2050, de 2.01 mil millones de toneladas de desechos en 2016, se proyecta un total de 3.4 mil millones de toneladas de desechos anuales para el año 2050 (What a Waste 2.0, 2019).

Especialmente, cuando provienen del caucho y los neumáticos de desecho, debido a su naturaleza y potencial contaminante, este tipo de desechos deben ser procesados y enterrados en rellenos sanitarios para su disposición final. Sin embargo, esto puede provocar la contaminación del suelo y subsuelo. Por ello, es importante encontrar formas de reutilizar total o parcialmente este residuo para transformar su potencial contaminante al final de su vida útil en una materia prima viable para la industria. Los neumáticos de desecho son uno de los materiales más contaminantes, debido a que el proceso de vulcanización es irreversible, lo que dificulta la creación de un plan de residuos. Para el tratamiento apropiado de este tipo de residuo, la industria cuenta con instalaciones especiales de reciclaje de las que se pueden obtener subproductos como fibras de reciclaje de llantas, caucho granulado, caucho en forma de chips, caucho en polvo, así como fibras de acero (Thomas et al., 2016).

Una de las soluciones posibles es utilizar el caucho como materia prima (Pérez, 2015). En la actualidad, la comunidad científica ha reconocido el problema que esto representa, por lo que se han analizado y propuesto diferentes alternativas para el uso del caucho tanto de la industria de residuos como del reciclaje, así como su aplicación en algunas áreas de la ingeniería. Esto conlleva desarrollo económico, creación de empleos, así como el cumplimiento del objetivo primordial: la reducción de contaminantes en el medio ambiente (Al-Salem et al., 2009; Ghosh, 2019; Ruwona et al., 2019; Yang et al., 2018).

Este análisis bibliométrico está basado en la búsqueda de los artículos más relevantes sobre el tema, así como en un análisis en profundidad de la literatura seleccionada, con el objetivo de recolectar datos sobre la importancia del estudio del caucho para la comunidad científica.

Este artículo tiene como objetivo realizar un análisis cuantitativo de cómo ha evolucionado el campo de estudio de la utilización del caucho en concretos, durante el período contemplado entre 1990-2020, con el propósito de recolectar los artículos de investigación más importantes para su análisis mediante el método bibliométrico *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015b), con el fin de obtener los artículos más relevantes tomando en consideración el número de citas, el año de publicación, así como el factor de impacto de la revista en la que se publicó (de Campos et al., 2018). Este artículo está dirigido a investigadores y profesionales del tema que requieran un análisis extenso de la literatura existente para trabajos futuros.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo, las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* (WoS) fueron consideradas por ser de mayor relevancia (principalmente la de Scopus) en el desarrollo del análisis bibliométrico para la investigación de la literatura, contemplando un período de búsqueda entre enero de 1990 y noviembre de 2020. Una vez seleccionadas estas variables, se realizó una búsqueda exploratoria en las bases de datos utilizando la palabra clave “*Rubberized concrete*” como punto de partida. Se encontraron un total de 610 artículos en la base de datos Scopus y un total de 357 artículos en la Web of Science. A partir de los resultados, se seleccionaron las principales palabras clave.

Posteriormente se generó una base de datos en formatos de Valores Separados por Comas (CSV) y Archivo de Texto (TXT) para su subsecuente análisis en una herramienta de software para la construcción y visualización de redes bibliométricas denominada VOSviewer. La Figura 1 muestra el diagrama de palabras clave de la base de datos de Scopus y WoS en función de la frecuencia de repetición de las palabras.

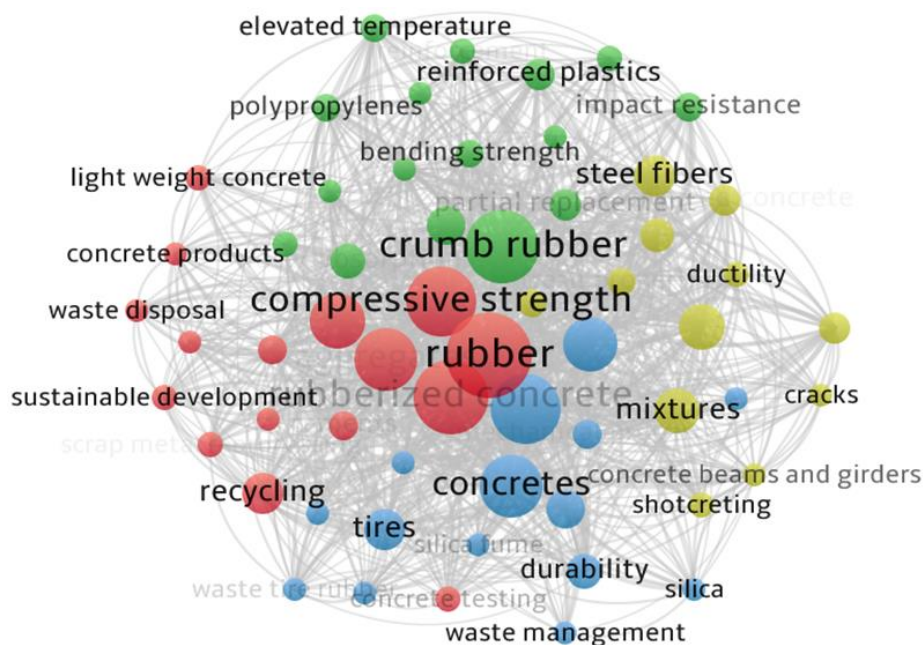


Figura 1. Mapa bibliométrico de la frecuencia (co-ocurrencia de palabra) con la cual se presenta la palabra clave “*rubberized concrete*” generado con VOSviewer

Para el análisis bibliométrico se utilizó el método Methodi Ordinatio (Pagani et al., 2015a), que consta de 9 etapas:

- Fase 1: Establecer la intención de búsqueda: el propósito de la búsqueda es analizar la información en las bases de datos sobre el tema “Rubberized concrete”.
- Fase 2: Búsqueda preliminar en la base de datos con la palabra clave “Rubberized concrete”.
- Fase 3: Decisión final de la combinación de palabras clave para la búsqueda en bases de datos “crumb rubber”, “behavior”, “mechanical properties”, “performance”, “strength”, “rubberized concrete”, “concrete”, “aggregate”, “durability” y “tire rubber”.
- Fase 4: Búsqueda final en las bases de datos: Los operadores booleanos utilizados son: “crumb rubber” AND “behavior” AND “mechanical properties” AND “performance” AND “strength” AND “rubberized concrete” AND “concrete” AND “Aggregate” AND “durability” AND “tire rubber”. Los resultados se exportaron a archivo en formato csv y txt para su posterior análisis en el software VOSviewer.
- Fase 5: Filtrado de la información: A partir de la fase anterior se obtienen los artículos a filtrar, luego se realizará el filtrado hasta obtener los artículos más relevantes por medio de la aplicación de la ecuación InOrdinatio.
- Fase 6: Identificación del factor de impacto, año de publicación y número de citas: Con los resultados obtenidos en la búsqueda en ambas bases de datos (Scopus, WoS) se extrajo el análisis por número de citas y año de publicación. El impacto de la revista se obtuvo a través de la base de datos Clarivate Analytics Incites Journal Citation Reports o la Scopus Source List en su sitio web.
- Fase 7: Realizar la clasificación de los artículos utilizando el *InOrdinatio*: Una vez finalizadas las fases 1 a 6, se utiliza la ecuación para calcular el índice *InOrdinatio*. La

ecuación considera el total de citas, el factor de impacto y el factor de ponderación proporcionado por el investigador, que se encuentra en un rango de 1 a 10.

$$InOrdinatio = \left(\frac{IF}{1000}\right) + \alpha (\text{research year} - \text{publication year}) + \sum Ci$$

donde,

IF = Factor de impacto (JCR, CiteScore, SJR or SNIP)

α = Coeficiente (1 al 10) que evalúa la importancia del año en que fue publicado el artículo

Research year = Año en la cual se está llevando a cabo la investigación

$\sum Ci$ = Número total de citas del artículo

Con el fin de considerar no solo las publicaciones gran trayectoria, se eligió un valor de alfa igual a siete (Pamplona Solis et al., 2019). Un valor alfa cercano a uno ($\alpha = 1$) genera portafolios con artículos clásicos, pero si los artículos recientes son más importantes para la investigación, entonces el valor de alfa debería estar más cerca de 10.

- Fase 8: Búsqueda de artículos: Una vez obtenido el ranking de artículos mediante el método *InOrdinatio*, su versión a texto completo fue obtenida a través de software de gestión de referencias como Mendeley, Citavi o Zotero.
- Fase 9. Lectura final y análisis sistemático de los artículos: La revisión sistemática puede resultar un trabajo extenso y laborioso; el *Methodi Ordinatio* ayuda a crear una lista ordenada de todos los artículos relevantes para facilitar el análisis del investigador.

VOSviewer es un Software que está diseñado para complementar este tipo de metodologías. La información que puede generar es la frecuencia de ocurrencia de una palabra clave que se muestra en función del tamaño de los círculos en los mapas. Los más pequeños representan palabras clave que no son tan relevantes, mientras los mediano (y más grandes) representan las palabras clave relevantes en los diferentes artículos publicados. Por ejemplo, la palabra "caucho" es más relevante por razones obvias. Sin embargo, en algunos artículos con esta palabra clave podemos encontrar temas de interés como el pretratamiento del material o la interfaz caucho-cemento. En comparación con las "fibras de acero", que son las fibras de acero extraídas de los neumáticos usados, hay poco interés de los investigadores en el tema debido a la escasa presencia de esta palabra clave. Esto deja en claro que este diagrama es útil para darnos una visión general de los temas que se han estudiado y no reflejan ningún resultado final, es un procedimiento previo al filtrado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de la búsqueda fue encontrar artículos que contengan la palabra "*rubberized concrete*" en el título, el resumen o en las palabras clave en el período comprendido entre 1990 y 2020.

El tema principal elegido para el análisis bibliométrico fue el uso de caucho en concreto, por lo que la primera búsqueda de artículos se realizó considerando que debían contener la palabra clave inicial "*rubberized concrete*". Se dio prioridad a los artículos que se encontraron en idioma inglés, así como en la base de datos Scopus. Para el período de análisis, se han registrado 610 artículos en Scopus y 357 en WoS. La primera publicación registrada en la base de datos Scopus fue en 1990 por la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM). El año de 2020 fue el de mayor producción científica con 125 artículos publicados en la base de datos Scopus y un total de 97 artículos en WoS. En la figura 2 se puede apreciar con mayor detalle cómo ha incrementado el estudio de este material para su aplicación en la construcción.

Los resultados obtenidos muestran la tendencia creciente del estudio del uso de caucho en mezclas

de concreto en los últimos diez años y destacan los artículos más relevantes utilizando el índice *InOrdinatio*.

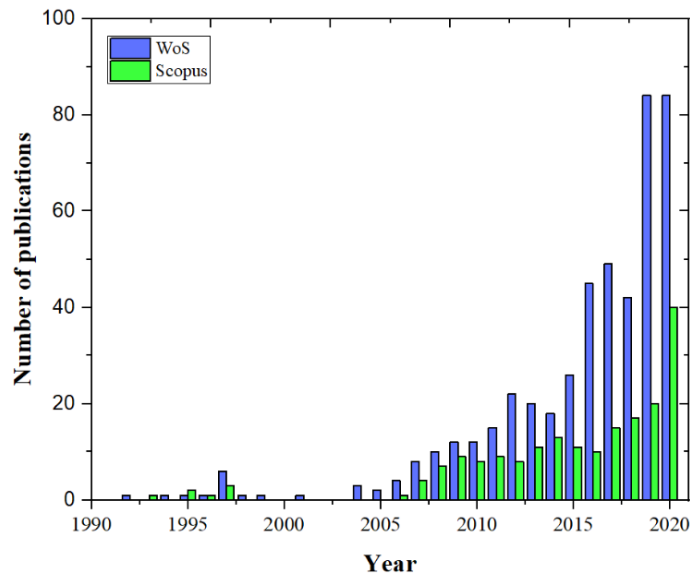


Figura 2. Número de artículos publicados por año.

La Figura 2 muestra que la frecuencia del número de artículos publicados por año en el estudio del uso de caucho en concreto es algo inconsistente, sin embargo, en los últimos diez años los científicos han tomado este tema en sus trabajos de investigación con más frecuencia. Esto resultó en una mayor productividad de los artículos (aparentemente la tendencia seguirá en aumento en los próximos años) y actualmente se investiga como una alternativa para mitigar la contaminación global causada por el desecho de neumáticos.

De acuerdo con la base de datos Scopus, hay un total de 610 artículos publicados sobre el tema ‘*rubberized concrete*’ y un total de 1182 autores entre enero de 1990 y noviembre de 2020.

La Figura 3 demuestra que el año con mayor actividad científica fue el año 2020 con un total de 409 autores. La tendencia de investigación sobre el tema ha aumentado sustancialmente a lo largo de los años.

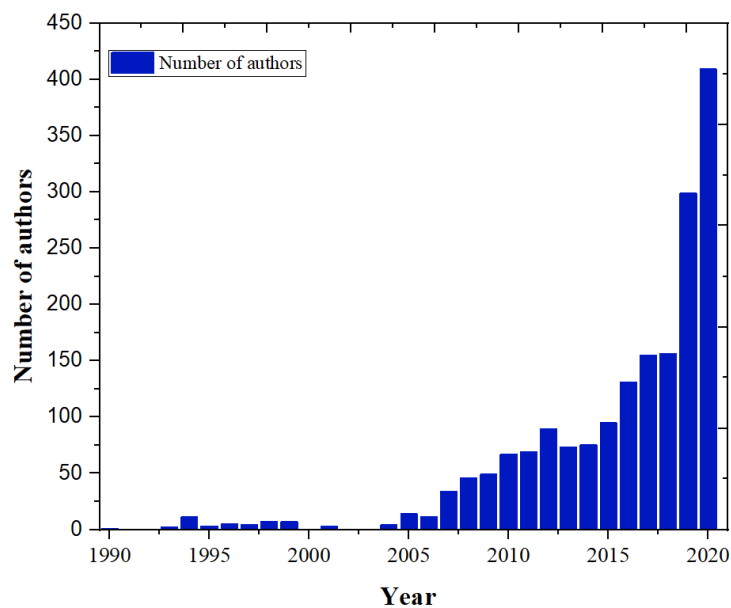


Figura 3. Número de autores por año 1990-2020.

La Figura 4 muestra el ranking de los diez países con mayores contribuciones en el tema ‘*rubberized concrete*’, los primeros diez lugares han sido considerados en base a la cantidad de artículos por año.

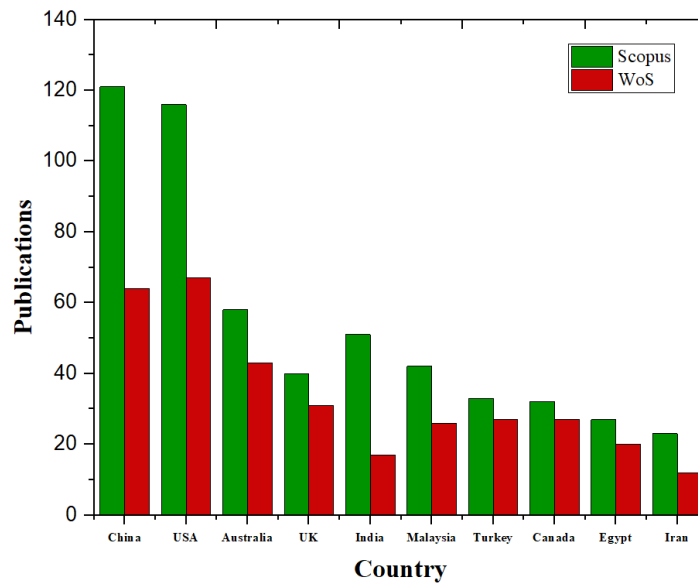


Figure 4. Top 10 of countries with the largest number of publications (Scopus and WoS).

El país con mayor productividad científica es China con 121 artículos publicados de acuerdo a Scopus y 64 en WoS, el segundo lugar es ocupado por Estados Unidos y Australia en tercer lugar. Una vez definido el conjunto de artículos para el análisis de la literatura, se realizó la búsqueda tanto en Scopus como en Web of Science. Para ello, se utilizó las siguientes expresiones de búsqueda: ‘TITLE-ABS-KEY (rubberized AND concrete) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2021’ en Scopus, y para el caso de Web of Science ‘TITLE-ABS-KEY (rubberized AND concrete) AND PUBYEAR > 1989 AND PUBYEAR < 2021’. Para el caso de WoS se consideró la colección completa, mientras que para Scopus se consideró la totalidad de su base de datos.

El portafolio total está conformado por un total de 967 de artículos. En la figura 4 se muestra cómo durante la aplicación del método *InOrdinatio* los artículos fueron descartados por relevancia o que su valor *InOrdinatio* no fuera suficiente alto para ser tomado en cuenta en el portafolio final de documentos a analizar. En la tabla 1 se encuentran los artículos que cumplieron con los criterios establecidos para un valor alfa igual a 7. La cantidad de artículos a analizar generados por el orden *InOrdinatio* fue significativa, dado el reciente aumento de productividad en el tema, en comparación con la última década, sin embargo, los artículos cumplieron el valor mínimo o mayor. Esto, debido a diversos factores como el número insuficiente de citas o el bajo factor de impacto de la revista para alcanzar el valor propuesto.

Tabla 1. Número de artículos antes de la aplicación de los filtros.

Filtro	Portafolio artículos	Artículos que cruzan	Artículos restantes	%
WoS	610			
Scopus	357			
Portafolio inicial	967			100
Duplicados	140	140	827	85.52
Reviews, Book articles, conferencias	98	98	729	75.38
Artículos publicados antes 2010	105	105	624	64.52
In Ordinatío <75	617	617	7	0.72
Total de artículos descartados	911			
Total de artículos considerados	7			

Tabla 2. Lista de artículos clasificados por medio del orden *InOrdinatio* que conforman el portafolio final.

Autor	Título	Año	InOrdinatio Alfa= 7	InOrdinatio
Pelisser et al.	Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition (Pelisser et al., 2011)	2011	1	280.007246
Najim et al.	Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete (Najim & Hall, 2012)	2012	2	181.004419
Su et al.	Properties of concrete prepared with waste tire rubber particles of uniform and varying sizes (Su et al., 2015a)	2014	3	135.007246
Thomas et al.	Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance (Thomas et al., 2016)	2016	4	132.007246
Onuaguluchi et al.	Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume (Onuaguluchi & Panesar, 2014)	2014	5	121.007246
Xue et al.	Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability (Xue & Shinozuka, 2013)	2013	6	104.004419
Youssf et al.	An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes (Youssf et al., 2014)	2014	7	87.004419

A pesar de que la mayoría de los artículos analizados han sido publicados recientemente, esto afecta al portafolio final de artículos ya que la mayoría de ellos no tienen las citas suficientes para cumplir con un valor de *InOrdinatio* igual o superior a 75 (tabla 2). Sin embargo, esto no significa que no existan artículos que en el futuro serán un punto de referencia para el estudio del uso del caucho en la construcción, específicamente en el concreto estructural y no estructural. Un ejemplo es la

interfaz caucho-cemento que, en el futuro, será de gran utilidad para el desarrollo de mezclas de concreto con adición de caucho a partir de este tema de investigación. Otros investigadores han aportado datos que serán útiles para investigaciones a largo plazo sobre el uso del caucho como aditivo en materiales compuestos y su eficiencia estructural (Ataria & Wang, 2019). Los artículos más importantes de acuerdo a los criterios establecidos en este análisis se enumeran en Tabla 2. Otros autores también han proporcionado un resumen de 30 años de investigación del caucho como material de construcción, proporcionando un análisis extenso sobre el pretratamiento, propiedades mecánicas, propiedades físicas y otros datos útiles (Roychand et al., 2020). Durante el análisis *InOrdinatio*, se analizaron un total de 967 artículos. Después de la aplicación del filtro número dos, un total de 382 artículos fueron considerados para el análisis final. La tabla 3 muestra las diez palabras clave más usadas en estudios de caucho en concreto, así como su frecuencia. Estos artículos fueron posteriormente analizados con el software VOSviewer, donde se puede apreciar que la palabra clave con mayor presencia en la mayoría de los artículos de estudios es ‘rubber’ con un total de 355 veces y la de menor frecuencia es “mechanical properties” con un total de 82 veces.

Tabla 3. Top 10 co-ocurrencia de palabras claves en el análisis bibliométrico

Palabra clave	Co-ocurrencia
rubber	355
rubberized concrete	305
concretes	234
compressive strength	218
aggregates	162
concrete aggregates	127
crumb rubber	128
tires	95
tensile strength	94
mechanical properties	82

En la Figura 5 se puede observar que la prioridad de los investigadores es incorporar el caucho en la industria de la construcción, de acuerdo a la literatura. Debido a que se trata de un problema de contaminación mundial, esta tendencia se refleja en el uso de las distintas palabras clave que se presentan en la tabla antes mencionada. Asimismo, en el tema del concreto con caucho, uno de los problemas que los investigadores han tratado de mejorar a lo largo de los años es la resistencia a la compresión, ya que es una de sus principales funciones, por lo que el estudio de esta propiedad específica es prioritario. Por esta razón, su frecuencia es mayor en comparación con las propiedades mecánicas. Tenga en cuenta que se pueden encontrar diferencias al cambiar los comandos booleanos, por lo que los resultados pueden ser diferentes y más específicos.

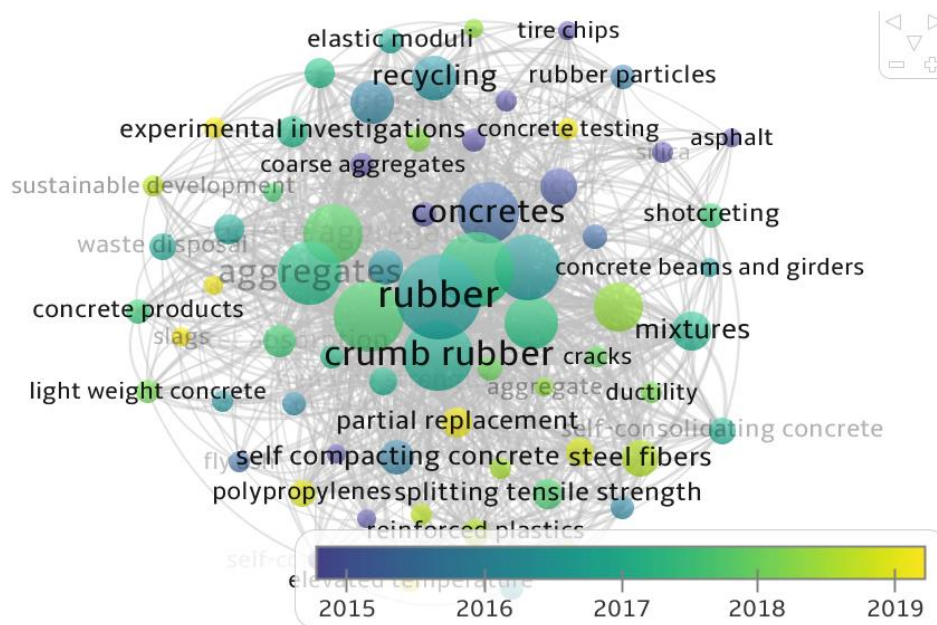


Figura 5. Diagrama de palabras claves basado en su co-ocurrencia.

Durante 30 años (1990-2021) de investigación en el tema del uso del caucho en el hormigón, 1,182 autores han participado en investigaciones del tema. Los autores con mayor número de citas y artículos publicados se enumeran en la Tabla 4. Sin embargo, fue hasta 2010 que el tema presentó un aumento considerable en la producción de artículos y documentos relacionados en los que diferentes estudios pretendían mejorar las propiedades del concreto con la adición de caucho en aplicaciones industriales.

Table 4. Top 10 de autores basado en la cantidad de documentos publicados y número de citas

Autor	Documentos	Citas
Mills J. E.	20	414
Youssf O.	18	399
Hassanli R.	17	234
Silvestre N.	11	187
Guadagini M.	14	166
Pilakoutas K.	14	166
Ma X.	11	164
De Brito J	9	147
Duarte A. P. C.	8	141
Julio E.	8	141

En cuanto a productividad, tenemos a Mills J. E. con 414 citas y 20 documentos hasta 2020, siendo el autor con mayor productividad. Por otro lado, los autores Duarte A. P. C. y Julio E. con 8 documentos y 141 citas ocupan los dos últimos lugares. La Figura 6 representa gráficamente el comportamiento de los datos presentados en la tabla 4. Este diagrama tiene como objetivo mostrar la coautoría, que es reflejado en la productividad. Esto ayuda a proporcionar un punto de partida para saber qué autores consultar si se pretende realizar una investigación sobre el tema de concreto con caucho añadido.

Durante el período contemplado entre los años 1990-2020, considerado en este trabajo, desde la publicación del primer artículo según la base de datos Scopus en 1991, el número de artículos publicados por año ha sido inferior a 10 hasta 2007.

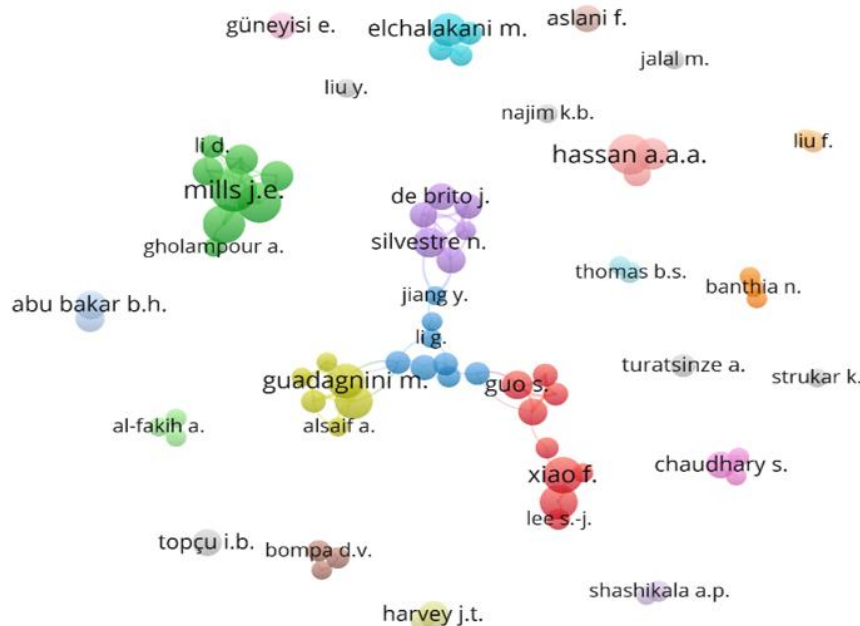


Figura 6. Diagrama de Co-autoría de publicaciones basadas en ‘rubberized concrete’

Durante el período de 1990 a 2020, se han publicado un total de 610 documentos según la base de datos Scopus. Se observa una tendencia inconsistente en las publicaciones hasta 2007, a partir de ese año, la productividad comenzó a aumentar significativamente hasta la actualidad. Para un mejor análisis, la figura 5 contiene los datos de los artículos publicados por año.

Tabla 5. Productividad de artículos por año del tópico ‘rubberized concrete’

Año	Artículos	Año	Artículos	Año	Artículos
1990	1	2001	2	2012	38
1991	0	2002	0	2013	27
1992	0	2003	0	2014	26
1993	1	2004	6	2015	30
1994	5	2005	5	2016	51
1995	2	2006	6	2017	58
1996	3	2007	9	2018	53
1997	6	2008	16	2019	87
1998	4	2009	21	2020	111
1999	2	2010	17		
2000	0	2011	23		
Total	610				

China, a pesar de ser el primer país con mayor productividad, es el noveno más citado. Mientras, el que ocupa el primer puesto es Irán con 482 citas, por lo que a pesar de su menor productividad ocupa el primer puesto (tabla 6). Esta tendencia puede deberse a que los artículos publicados por investigadores iraníes tienen un factor de impacto de revista más alto en comparación con los investigadores chinos que a pesar de su alta productividad, su factor de impacto no es tan alto. Un ejemplo de esto son Su et al. (2015b) y Chen et al. (2019) que a pesar de ser artículos antiguos pueden considerarse clásicos sobre el tema.

Table 6. Top 10 de los países más citados.

País	Citas
Iran	482
Turkey	435
Canada	362
United States of America	282
Australia	271
India	231
Iraq	148
Egypt	113
China	84
Malaysia	65

Australia y Estados Unidos tienen una relación productividad-citas similar. Siendo estos los países más importantes cuando se consideran ambas variables. Sin embargo, Irán presenta el mayor número de citas y el décimo lugar en productividad de documentos. La Figura 7 muestra una representación gráfica de la colaboración entre países y cómo están vinculados entre sí. Es un complemento al diagrama de la Figura 6, pero se centra en la colaboración entre países en un intento de especificar qué lugares del mundo tienen interés en el tema en términos de productividad científica.

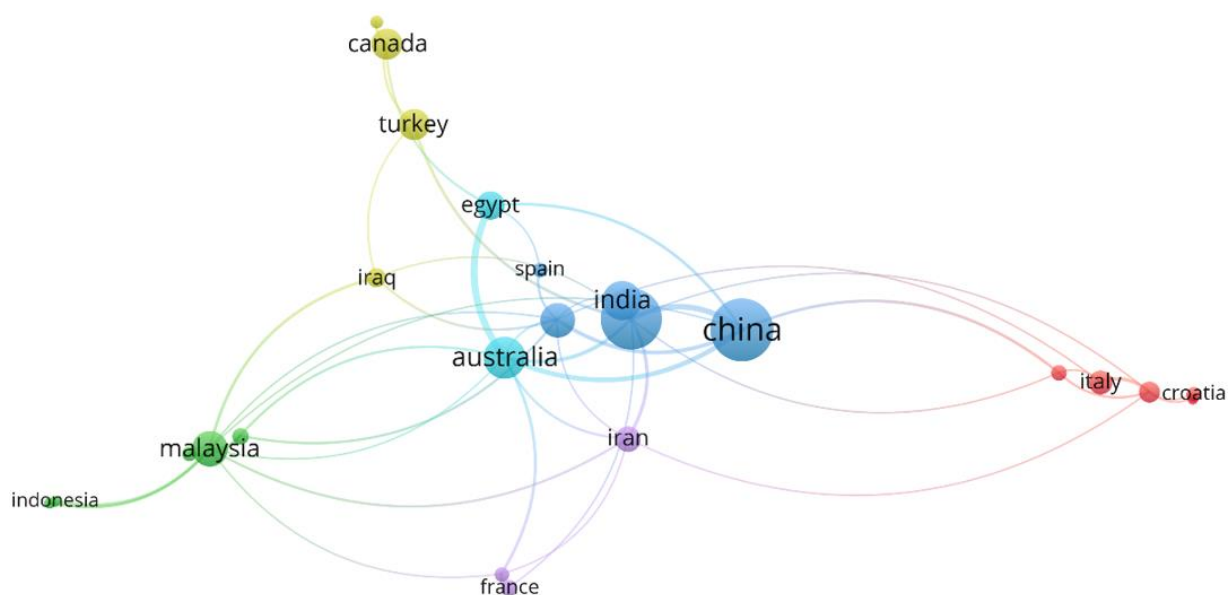


Figura 7. Colaboración entre países basado en la co-autoría de publicaciones del tema ‘rubberized concrete’

La revista con mayor productividad es Construction and Building Materials con un factor de impacto de 4.69. Sin embargo, Journal of Cleaner Production tiene un factor de impacto de 7.10, estos valores de impacto son de acuerdo a Clarivate Analytics.

Los objetivos y el alcance de las revistas son principalmente construcción, ciencia de materiales y temas ambientales. En general, la mayor parte de la investigación se centra en la construcción sostenible (Su et al., 2015b), materiales alternativos (Yang et al., 2018) y, en algunos casos, análisis mecánico de estructuras (Ataria & Wang, 2019) (Tabla 7).

Tabla 7. Productividad de publicaciones y citas por revista

Fuente	Documentos	Citas
Construction and Building Materials	115	3739
Journal of Cleaner Production	32	1354
Journal of Materials in Civil Engineering	23	1291
Engineering Structures	8	153
ACI Materials Journal	13	187
Materials and Structures/Materiaux et Constructions	11	403
Materials	14	86
Composite Structures	8	82
Journal of Building Engineering	7	142
Structures	6	95

Las tres revistas con mayor número de citas son *Construction and Building Materials* con 3739 citas, *Journal of Cleaner Production* con 1354 y *Journal of Materials in Civil Engineering* con 1291. Estas tres revistas son las de mayor productividad y cantidad de citas en el mundo (Tabla 7). La Figura 8 muestra gráficamente cómo se comportan los datos y proporciona una idea de cuáles son las revistas más importantes que los autores consideran para sus publicaciones. Es un complemento de la tabla 7 y nos brinda una representación visual de los datos presentados en esta tabla.

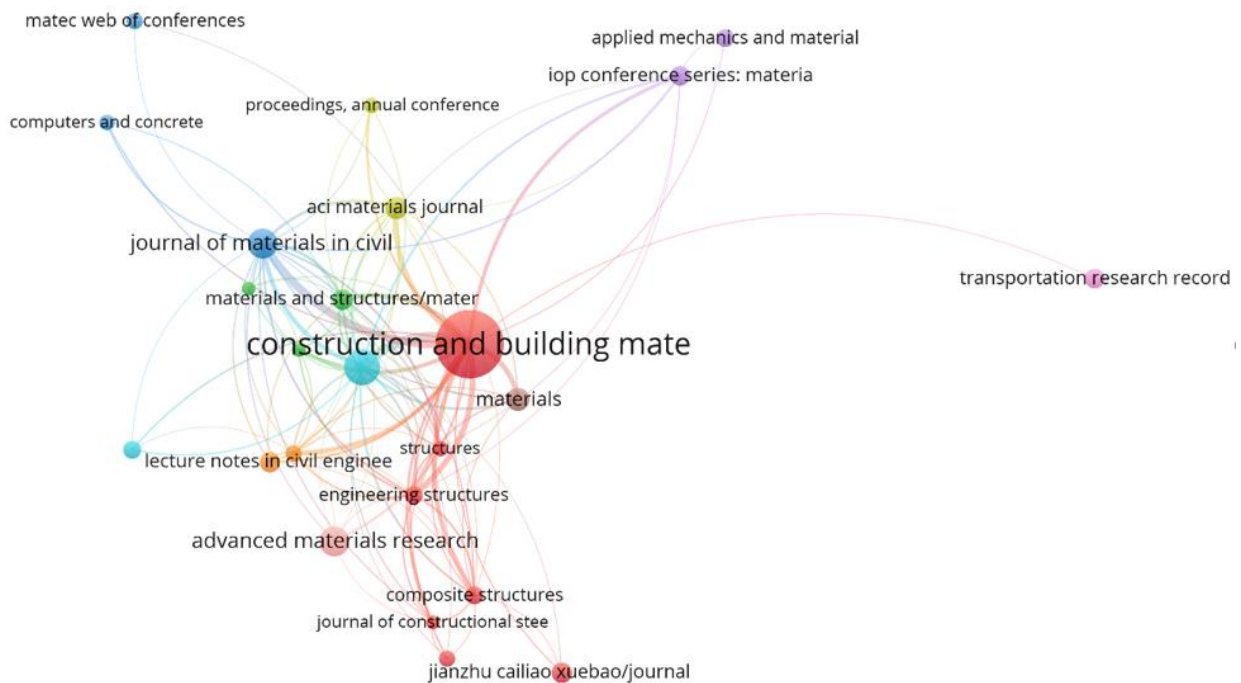


Figura 8. Mapa bibliométrico basado en las citas de las revistas más relevantes en el tema 'rubberized concrete'

4. REVISIÓN CRÍTICA DE LAS PRINCIPALES CONTRIBUCIONES Y NECESIDADES ACTUALES DE HORMIGÓN CON RESIDUOS DE NEUMÁTICOS

En investigaciones se pudo comprobar que el uso de microsilice mejora la resistencia mecánica del hormigón con la adición de caucho (hormigón de caucho). Solo se puede obtener un 14% de reducción en la resistencia a la compresión. Sin embargo, sería interesante investigar cómo se puede afectar o mejorar la resistencia a la compresión con el complemento de microsilice. El microsilice aporta una mejor interfaz entre el caucho y el cemento, por lo que se puede proponer para el diseño de mezclas de concreto con la adición de caucho como material cementoso para mejorar la interfaz entre el caucho y el cemento (Pelisser et al., 2011).

Las propiedades mecánicas y dinámicas de autocompactación del concreto fueron investigadas, se utilizó caucho granulado como sustituto del agregado fino, agregado grueso y sustitución de ambos (agregado fino y grueso). Las propiedades mecánicas del hormigón con adición de caucho en este caso son suficientes para ser utilizado en un entorno real. Sin embargo, los resultados de las pruebas de propiedades dinámicas superaron los datos obtenidos en las pruebas realizadas sobre hormigón convencional. La continuidad de este trabajo puede realizarse realizando un análisis sísmico que pueda arrojar algo de luz sobre la aplicación de este material en elementos estructurales como cimentaciones (Najim & Hall, 2012).

Investigaciones relacionadas con problemas de durabilidad en concreto con adición de caucho concluyeron que para un porcentaje de 7.5% se obtiene una menor penetración de cloruros en el material. En cuanto al ataque ácido, se observa una disminución de peso y resistencia a la compresión de la muestra. A su vez, la capacidad de disipación de energía del hormigón puede aumentar con la adición de caucho. Esta propiedad tiene una aplicación potencial en estructuras expuestas a terremotos. Se concluyó que la adición de caucho reduce la respuesta a las vibraciones (Tomas et al., 2016).

La influencia del tamaño de partícula de caucho en la adición también fue investigada. Se concluyó que la adición de caucho en el hormigón afecta la manejabilidad y la permeabilidad en comparación con un hormigón convencional. Específicamente, tamaños más grandes de partículas mejorarán las propiedades mencionadas anteriormente. Investigaciones más rigurosas deben ser realizadas para analizar la granulometría y determinar un tamaño de partícula óptimo de caucho para obtener mejores propiedades físicas con respecto a la norma ASTM C 33, lo que puede darnos un parámetro para una aplicación desde un punto de vista más técnico, así como que podría dar la pauta para crear un sistema de diseño para mezclas de concreto con la adición de caucho (Youssf et al., 2014).

4. CONCLUSIÓN

Este artículo tuvo como objetivo analizar los últimos 30 años de investigación sobre el caucho y su aplicación en hormigones estructurales y no estructurales a través del análisis *Methodi Ordinatio*. El análisis bibliométrico de la literatura mostró que, desde 2010 los científicos han considerado el impacto de la contaminación a nivel mundial provocada por los neumáticos de desecho, lo que lleva a la comunidad científica a buscar la forma de reducirla mediante la reutilización.

Durante estos 30 años, se han publicado 967 documentos sobre el uso del caucho en concreto estructurales y no estructurales durante el período 1990-2020, 1182 autores han contribuido sobre el tema hasta el momento de escribir este artículo.

Se han estudiado diferentes propiedades como la resistencia a la compresión, el volumen de caucho en las mezclas de hormigón, así como la granulometría de las partículas de caucho y su posible influencia en la resistencia del hormigón.

Actualmente, nuevos estudios revelan datos que servirán en futuras investigaciones como el comportamiento de la interfaz caucho-cemento y el potencial que tiene el caucho cuando se utiliza en materiales compuestos. Todo ello abre una nueva etapa en la investigación de este material para su aplicación directa en diferentes tipos de situaciones en la industria de la construcción.

De acuerdo con el análisis de la literatura, el uso del caucho en el concreto tiene una menor resistencia mecánica que el hormigón convencional y también la resistencia mecánica disminuye a medida que aumenta el volumen de caucho en la mezcla de hormigón, aunque el potencial como adición en materiales compuestos muestra que la incorporación de la adición de caucho puede ser beneficioso en aplicaciones estructurales. El uso de diferentes tamaños de partículas en la adición de caucho es un tema que aún requiere un estudio más profundo, ya que faltan datos concluyentes sobre la granulometría de la adición y su efecto sobre el hormigón. En la actualidad, es teóricamente conocido que el tamaño puede influir en la resistencia a la compresión y su porosidad, sin embargo, no existen tamaños específicos que permitan un estándar de diseño para mezclas de concreto con adición de caucho.

En un contexto global, se puede observar con base a los datos que, según los datos analizados, desde 2010, se ha incrementado el interés de los investigadores por introducir el caucho en la construcción con el fin de reducir la contaminación a nivel global. Sin embargo, aún falta una normativa para su uso en una situación real, valores de granulometría y un método de diseño de mezcla para esta adición específica, por lo que hay que investigar más sobre las características de este material para que pueda ser regulado para su uso apropiado.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el soporte del Proyecto Cátedra CONACYT número 746, LNS_202101008N y al Proyecto CONACYT Fronteras (2096029).

6. REFERENCIAS

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009). *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. Waste Management, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Ataria, R. B., Wang, Y. C. (2019). *Bending and shear behaviour of two layer beams with one layer of rubber recycled aggregate concrete in tension*. Structures, 20, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.014>
- Chen, Z., Li, L., Xiong, Z. (2019). *Investigation on the interfacial behaviour between the rubber-cement matrix of the rubberized concrete*. Journal of Cleaner Production, 209, 1354–1364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.305>
- de Campos, E. A. R., Pagani, R. N., Resende, L. M., Pontes, J. (2018). *Construction and qualitative assessment of a bibliographic portfolio using the methodology, Methodi Ordinatio*. Scientometrics, 116(2), 815–842. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2798-3>
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2019). *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7290-1>
- Najim, K. B., Hall, M. R. (2012). *Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete*. Construction and Building Materials, 27(1), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>
- Onuaguluchi, O., Panesar, D. K. (2014). *Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume*. Journal of Cleaner Production, 82, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068>
- Pagani, R. N., Kovalski, J. L., Resende, L. M. (2015a). *Methodi Ordinatio: A proposed*

- methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication.* *Scientometrics*, 105(3), 2109–2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., Resende, L. M. (2015b). *Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication.* *Scientometrics*, 105(3), 2109–2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- Pamplona Solis, B., Cruz Argüello, J. C., Gómez Barba, L., Gurrola, M. P., Zarhri, Z., Trejo Arroyo, D. L. (2019). *Bibliometric Analysis of the Mass Transport in a Gas Diffusion Layer in PEM Fuel Cells.* *Sustainability*, 11(23), 6682. <https://doi.org/10.3390/su11236682>
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., Bernardin, A. M. (2011). *Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition.* *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>
- Perez, J. G. (2015). *Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho.* 79.
- Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., Mills, J. E. (2020). *A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete.* *Construction and Building Materials*, 237, 117651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651>
- Ruwona, W., Danha, G., Muzenda, E. (2019). *A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres.* *Procedia Manufacturing*, 35, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.029>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., Dirar, S. (2015a). *Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes.* *Journal of Cleaner Production*, 91, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., Dirar, S. (2015b). *Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes.* *Journal of Cleaner Production*, 91, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., Panicker, V. J. (2016). *Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance.* *Journal of Cleaner Production*, 112, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>
- What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. (2019, January 7). *Green Growth Knowledge Platform.* <https://www.greengrowthknowledge.org/research/what-waste-20-global-snapshot-solid-waste-management-2050>
- Xue, J., Shinozuka, M. (2013). *Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability.* *Construction and Building Materials*, 42, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005>
- Yang, Z., Ji, R., Liu, L., Wang, X., Zhang, Z. (2018). *Recycling of municipal solid waste incineration by-product for cement composites preparation.* *Construction and Building Materials*, 162, 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.081>
- Youssf, O., ElGawady, M. A., Mills, J. E., Ma, X. (2014). *An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes.* *Construction and Building Materials*, 53, 522–532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>