

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**



CONTENIDO

REVISIÓN

Machado, E. L., Pasdiora, L., Santos, A. P. L., Santos Filho, M. L.: Identificación de criterios para la evaluación de edificios escolares. 143 - 161

Moreno, A., Ponce P., Múzquiz, E., Avalos, F.: Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos. 162 - 183

INVESTIGACIÓN BÁSICA

Ferreira, F. G. S., Dias, L. V., Soares, S. M., Castro, A. L.: Influencia del curado térmico en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón de ultra alto desempeño con polvo de vidrio. 184 - 199

Silva, R. R. C., Bertoldo, C.: Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico. 200 - 209

Cattelan, R., Cielo, L., Santos Lübeck, A., Neto, A. B. S.: Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas. 210 - 226

Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O.: Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos. 227 - 247

INVESTIGACIÓN APLICADA

Ramos, A. L., Bauer, E.: Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. 248 - 262

CASO DE ESTUDIO

Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R.: Evaluación no destructiva del estado de conservación de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reúso en su restauración. 263 - 278

Coni, G., Tafuri, A., Costa, A., Sakuma, G.: Degradación del hormigón mediante la formación de ácido sulfúrico biogénico en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales (EEE). 279 - 295

Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R.: Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís. 296 - 310

Mensaje del Editor en Jefe

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 segundo número de nuestro doceavo año.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de producción citable (investigaciones básicas o aplicadas, y revisiones), investigación documental y casos de estudio, relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones.

Esta edición V12 N2, inicia con un trabajo procedente de **Brasil**, donde E. L. Machado y colegas identifican qué criterios se deben considerar en la evaluación de edificios escolares, a través de una revisión sistemática de la literatura, consulta de normas y directrices gubernamentales y consultas a expertos. La investigación se llevó a cabo en 3 etapas: 1) revisión sistemática de la literatura y 2) revisión de normas y directrices nacionales para identificar criterios y 3) ponderación de criterios, mediante la aplicación del método Delphi. Se identificaron 70 criterios de evaluación, los cuales fueron agrupados en 11 categorías y ponderados mediante consulta a expertos. La identificación de criterios, tal como se presenta en esta investigación, tiene como objetivo contribuir al desarrollo de técnicas y métodos de evaluación, para posteriormente, redactar una norma de desempeño para edificios escolares.

En el segundo trabajo, procedente de **México**, A. Moreno y colegas hacen una revisión de los trabajos realizados usando polvo de mármol como sustitución de cemento, arena o agregado fino en concreto, mortero y ladrillos. Se revisaron investigaciones realizadas en varias partes del mundo con procedimientos experimentales diferentes. Se concluye que el polvo de mármol se puede usar como sustituto parcial de cemento o agregado fino (hasta por un 15 %, dependiendo del material a sustituir), sin afectar la resistencia a compresión de las muestras o las piezas, y sin importar la forma. Por lo tanto, el polvo de mármol no sólo ayuda a aminorar la contaminación que genera, sino que también a la reducción de uso como arena y polvillo, aportando al desarrollo sustentable.

El tercer trabajo de este número es de **Brasil**, donde F. G. S. Ferreira y colegas evalúan el impacto del curado térmico y el uso de empaquetamiento de partículas en compuestos cementosos de ultra alto desempeño (UHPC), con y sin polvo de vidrio. Para ello, las probetas fueron moldeadas con 0% y 50% de polvo de vidrio (reemplazo volumétrico al cemento), además de dos mezclas obtenidas a través del empaquetamiento de partículas. Las muestras fueron sometidas a curado térmico y curado húmedo para comparar los efectos. Se

realizaron pruebas de resistencia a la compresión y absorción por capilaridad. Los resultados indicaron que el curado térmico proporciona ganancia de la resistencia inicial. La aplicación del empaquetamiento de partículas en las dosis de mezcla resultó en una mejora significativa en las propiedades de las muestras y el polvo de vidrio demostró ser un sustituto viable del cemento.

En el cuarto artículo procedente de **Brasil**, R. R. C. Silva y C. Bertoldo simulan manifestaciones patológicas en muros pantalla a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, proponiendo obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez a través de la propagación de ondas de ultrasonido. Se realizaron ensayos de compresión para determinar resistencia y rigidez, así como ensayos de ultrasonido por el método directo e indirecto sobre hormigones producidos con diferentes concentraciones de polímero sintético. Los resultados obtenidos indicaron una disminución de las propiedades mecánicas y acústicas del hormigón con el aumento de la concentración de polímero sintético en su confección. Los modelos generados por la prueba ultrasónica fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 95%, y las correlaciones establecidas en concreto pueden ser utilizadas en la detección de manifestaciones patológicas in loco.

El quinto artículo, de R. Cattelan y colegas, proviene de **Brasil**, y evalúan la influencia de las variaciones de excentricidad de los cables en modelos con losas planas postensadas. El correcto posicionamiento de los tendones en el montaje de losas planas postensadas es fundamental para que el sistema estructural logre un adecuado rendimiento y seguridad. Se analizaron cuatro modelos arquitectónicos diferentes con modificación de la altura de los cables en diferentes puntos y cantidad. Se evaluaron tensiones de pre compresión, tensiones extremas en el tope y base, desplazamientos verticales, balanceo de carga y cantidad de acero pasivo de las losas. Para el análisis se utilizó el software ADAPT Floor Pro. El proyecto sigue las recomendaciones de la NBR 6118:2014 y ACI 318:2019. Para los modelos evaluados, se encontró que la variación en la excentricidad vertical de los tendones en la base de la losa reduce aún más los valores de las tensiones aplicadas, en comparación con la variación en el tope.

El sexto trabajo de este número lo escriben Elia Alonso y colegas de **México**, en el cual analizaron modificaciones presentadas por distintos estabilizadores (cal, cemento, fibra de nopal, líticos de río, líticos volcánicos, sulfato de sodio y yeso) en propiedades y envolvente de falla de un suelo arcilloso natural remoldeado de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Al suelo arcilloso se le realizó granulometría, hidrometría, pruebas índice, compresión simple y prueba Proctor; a las mezclas estabilizadas se determinó la variación en propiedades índice y envolvente de falla. Las adiciones propuestas mejoran el comportamiento del suelo altamente plástico, disminuyendo las deformaciones volumétricas e incrementando su resistencia mecánica normal, al

cortante y ángulo de fricción interna. La investigación contribuye favorablemente a la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas. La investigación fue realizada en laboratorio bajo normatividad internacional.

En el séptimo trabajo, procedente de **Brasil**, Ana Lin Ramos y Elton Bauer estudian las condiciones de exposición a agentes degradantes en edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Conocer la acción de la meteorización es fundamental para comprender la degradación de las fachadas. Para ello, se seleccionaron ocho ciudades: Curitiba, Santa María, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos y Belém. Se definió un modelo de construcción de simulación higratérmica para evaluar radiación total, amplitud térmica, choque térmico, índice de intensidad de temperatura y lluvia dirigida. Como resultado, se identifican zonas de condiciones críticas, proporcionando clasificaciones de exposición. Para agentes de temperatura y lluvia dirigida, las zonas más expuestas son Goiânia y Belém. Las zonas de exposición más suaves son Belém para agente de temperatura y Niterói para lluvia dirigida.

El octavo trabajo es un caso de estudio procedente de **Cuba**, donde Alberto Hernández Oroza y colegas hacen una evaluación a través de clasificación visual y ensayos no destructivos, el estado de conservación de 32 vigas de madera para su reuso en el proyecto de restauración del edificio Narciso López del Centro Histórico de la Habana. Para esto se realizaron mediciones del contenido de humedad, penetrómetro, estimación del módulo de elasticidad y tensión de rotura mediante velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados mostraron que el 66% de las vigas presentaban afectación por pudrición, desfibramiento y fisuración. Los ensayos realizados a las vigas deterioradas permitieron determinar que, para una confiabilidad del 95%, de las restantes 21 vigas era posible reutilizar 17 de ellas con una densidad promedio de 0.4 g/cm³.

El noveno trabajo de este número procede de **Brasil**. En este caso de estudio, G. Coni y colegas presentan el estudio realizado en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales luego de que se observara una severa degradación. El ataque del ácido sulfúrico biogénico en los sistemas de alcantarillado es ampliamente estudiado en la literatura, sin embargo, los datos sobre situaciones reales de construcciones aún son bastante limitados. Se realizaron análisis de concentración de H₂S en el aire, profundidad de carbonatación, ensayo de resistencia a la compresión, petrografía, SEM/EDS, XRD y determinaciones químicas en núcleos de hormigón extraídos por encima del nivel del efluente. Los productos identificados en la superficie fueron gipsita, jarosita, hidróxido ferroso, cloruro ferroso y posiblemente hisingerita. Los resultados demuestran la presencia en la superficie de ambos productos de la disolución de pasta de cemento y barras de acero de 16 mm ubicadas en la región atacada

El artículo que cierra la edición es de Alberto Hernández Oroza de **Cuba** y colegas, quienes diagnostican y proponen solución a las lesiones presentes en los forjados de madera del Convento de Santa Clara. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos de resistografía y penetrómetro, estudios biológicos a la madera, y técnicas geomáticas para análisis de deformación y dimensionamiento de las vigas. Los resultados del diagnóstico demostraron que el 65% del forjado compuesto de 98 vigas está afectado por pudrición y organismos xilófagos. Los estudios de densidad mediante comparación con valores de referencia mostraron pérdida en la dureza de la madera. Los resultados concluyen que la restauración implica la necesidad de sustituir 17 vigas, y el refuerzo de los pies derechos y secciones de vigas de corredera.

Es importante mencionar que los ONCyTS de Brasil y México han mantenido a Revista Alconpat en sus índices de Revistas Científicas de Calidad. En particular, en México, la Revista Alconpat se ha consolidado a nivel internacional y ya el Sistema Nacional de Investigadores la contempla como producto válido para promoción y permanencia de sus miembros. Este ha sido un gran logro, producto del esfuerzo de todos, autores, revisores y comité editorial. De igual forma, es importante mencionar que Revista Alconpat ya pertenece al Directorio de Revistas de Acceso Abierto (Directory of Open Access Journals, DOAJ), lo cual es un paso definitivo para aplicar a nuevos índices. Alconpat está haciendo también una inversión económica importante para que todos sus números estén marcados en XML-Jats para que pueda ser evaluada en índices de mayor prestigio. Enhorabuena y nuestro agradecimiento a todos.

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.

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe

Identificación de criterios para la evaluación de edificios escolares

E. L. Machado^{1*}, L. Pasdiora², A. P. L. Santos³, M. L. Santos Filho⁴

*Autor de Contacto: eduarda.lauck@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.532>

Recepción: 25/03/2021 | Aceptación: 12/02/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es identificar qué criterios se deben considerar en la evaluación de edificios escolares, a través de una revisión sistemática de la literatura, consulta de normas y directrices gubernamentales y consultas a expertos. La investigación se llevó a cabo en 3 etapas: 1) revisión sistemática de la literatura y 2) revisión de normas y directrices nacionales para identificar criterios y 3) ponderación de criterios, mediante la aplicación del método Delphi. Se identificaron 70 criterios de evaluación, los cuales fueron agrupados en 11 categorías y ponderados mediante consulta a expertos. La identificación de criterios, tal como se presenta en esta investigación, tiene como objetivo contribuir al desarrollo de técnicas y métodos de evaluación, para posteriormente, redactar una norma de desempeño para edificios escolares.

Palabras clave: infraestructura escolar; desempeño del edificio escolar; criterios de evaluación de edificios escolares; revisión sistemática de literatura; delphi.

Citar como: Machado, E. L., Pasdiora, L., Santos, A. P. L., Santos Filho, M. L. (2022), “Identificación de criterios para la evaluación de edificios escolares”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 143 – 161, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.532>

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

³ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

⁴ Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el 1er autor contribuyó con las actividades de aplicación de la técnica Delphi y discusión de los resultados, el 2º autor con la actividad de Revisión de Literatura, el 3º autor contribuyó con la idea original y dirección de la investigación y el 4º autor contribuyó con la selección de especialistas y revisión de reglamentos.

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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Identification of criteria for evaluating school buildings

ABSTRACT

The objective of this research is to identify which criteria should be considered in the evaluation of school buildings, through a systematic review of the literature, consultation of government norms and guidelines and consultations with experts. The research was carried out in 3 stages: 1) systematic review of the literature and 2) review of national standards and guidelines to identify criteria and 3) weighting of criteria, through the application of the Delphi method. 70 evaluation criteria were identified, which were grouped into 11 categories and weighted through consultation with experts. The identification of criteria as presented in this research, aims to contribute to the development of techniques and evaluation methods, to later compose a performance standard for school buildings.

Keywords: school infrastructure; performance of school buildings; school building evaluation criteria; systematic literature review; delphi.

Identificação de critérios para avaliação de edificações escolares

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é identificar quais critérios devem ser considerados na avaliação de edifícios escolares, por meio de uma revisão sistemática da literatura, consulta a normas e diretrizes governamentais e consultas a especialistas. A pesquisa foi realizada em 3 etapas: 1) revisão sistemática da literatura, 2) revisão de normas e diretrizes nacionais, para identificação dos critérios e 3) ponderação dos critérios, por meio da aplicação do método Delphi. Foram identificados 70 critérios de avaliação, que foram agrupados em 11 categorias e ponderados por meio da consulta a especialistas. A identificação dos critérios conforme apresentado nesta pesquisa, visam contribuir para o desenvolvimento de técnicas e métodos de avaliação, para posteriormente compor uma norma de desempenho para edifícios escolares.

Palavras-chave: infraestrutura escolar; desempenho de edifícios escolares; critérios de avaliação de edifícios escolares; revisão sistemática da literatura; delphi.

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 ambiente escolar y los espacios interiores juegan un papel importante en la mejora o en el entorpecimiento de los procesos de enseñanza y aprendizaje. Las instalaciones escolares bien diseñadas, adecuadamente amuebladas y mantenidas contribuyen a un mejor rendimiento académico que se refleja positivamente en el desarrollo de los estudiantes. (Hassanain; Ali Iftikhar, 2015).

Tal como lo señala Cardoso (2017), los planificadores de infraestructura escolar se enfrentan a un escenario en el que existe la necesidad de crear un espacio cómodo y estimulante para los niños, sin embargo, considerando las limitaciones económicas brasileñas, no es posible pretender una transformación de esta realidad sólo con la construcción de nuevas unidades, por lo tanto, es necesario definir estrategias para la adecuación de las edificaciones existentes.

Estudios nacionales e internacionales señalan muchas deficiencias en relación al mantenimiento y conservación de los edificios escolares (Norazman, Norsafiah, et al., 2019; Marques, De Brito, Correia, 2015; Mojela, Thwala; 2014; Mydin et al., 2014; Tan et al., 2014; Ali et al.; 2013; Shehab, Noureddine 2013; Soares Neto et al., 2013; Boothman, Higham, Horsfall, 2012; Asiya, 2012; Gomes e Regis; 2012).

Beauregard y Ayer (2018) destacan la importancia de establecer un proceso para priorizar las órdenes de trabajo de mantenimiento de las instalaciones, buscando optimizar los recursos públicos. Por lo tanto, la selección de los criterios a evaluar se convierte en el primer paso para obtener esta priorización de las actividades de conservación de las escuelas. La identificación de criterios para evaluar edificios es un tema recurrente en estudios de casos relacionados con el control de calidad, la patología y la recuperación de edificios, como la investigación de Sotsek, Leitner y Santos (2019). Como señala Koleoso et al., (2013), medir el desempeño de un edificio es la forma más segura de mejorar el desarrollo económico, físico y funcional de un edificio, asegurando que se cumplan sus objetivos.

En ese sentido, este artículo tiene como objetivo identificar qué criterios se deben considerar en la evaluación de edificios escolares, a través de una revisión sistemática de la literatura, consulta de estándares nacionales e internacionales y consultas con expertos, visando la conservación de las edificaciones y garantizando el adecuado desempeño.

2. NORMAS Y DIRECTRICES PARA LA EVALUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA ESCOLAR EN BRASIL

En Brasil, no existen estándares específicos para evaluar una infraestructura escolar. Sin embargo, existen reglas para evaluar edificios en general, que pueden guiar la evaluación de un edificio escolar. Estas normas son elaboradas por el Comité Brasileño de Construcción Civil, de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT/CB-002), que es responsable de la normalización del sector.

La principal norma de evaluación de edificaciones es la ABNT NBR 15575 (2021), “Desempeño de edificaciones habitacionales”, que establece los requisitos y criterios de desempeño que se aplican a los edificios residenciales, buscando satisfacer los requerimientos de los usuarios, los cuales son: seguridad, habitabilidad y sustentabilidad.

Sin embargo, esta regla no se aplica a las obras en curso o los edificios terminados a la fecha de entrada en vigor, ni a las renovaciones, modificaciones y edificios temporales.

Además de la ABNT NBR 15575 (2021), otras normas que abordan el desempeño de las edificaciones son la ABNT NBR 14037 (2014) “Directrices para la elaboración de manuales de uso, operación y mantenimiento de las edificaciones – Requisito para la elaboración y presentación de contenidos”, ABNT NBR 5674 (2012) “Mantenimiento de edificios – Requisitos para el sistema

de gestión del mantenimiento”, y ABNT NBR 16280 (2015 “Renovación de edificios – Sistema de gestión de la renovación – Requisitos”.

Recientemente, se elaboró otra norma, la ABNT NBR 16747 (2020), "Inspección de Edificios - Directrices, conceptos, terminología, requisitos y procedimiento", que proporciona directrices, requisitos y procedimientos relacionados con la inspección de edificios, con el objetivo de estandarizar la metodología, estableciendo métodos y pasos mínimos de la actividad. La norma se aplicará a los edificios de cualquier tipo, públicos o privados, para la evaluación global del edificio, fundamentalmente mediante exámenes sensoriales por parte de un profesional cualificado.

La Prova Brasil y el Censo Escolar han sido los métodos utilizados para evaluar la infraestructura de una escuela en términos de aprendizaje y desempeño.

La Prova Brasil es una evaluación censal, creada por el Instituto Nacional de Estudios e Investigaciones Educativas (INEP) en 2005, para evaluar la calidad de la educación ofrecida por el sistema de educación pública brasileño; a través de pruebas estandarizadas en las áreas de Lengua Portuguesa y Matemáticas, proporciona datos para Brasil, unidades de la federación, municipios y escuelas participantes. Además de las pruebas, los alumnos también responden un cuestionario sobre aspectos relacionados con el origen socioeconómico y cultura, así como sobre prácticas escolares y de estudio. Los directores y docentes también responden cuestionarios que involucran aspectos relacionados con los recursos escolares, la organización y gestión escolar, el clima académico y las prácticas pedagógicas. (Gomes e Regis, 2012).

En esta prueba se evalúa el estado de conservación de los elementos y equipamientos del edificio. (techo, paredes, piso, entrada del edificio, patio, pasillos, aulas, puertas, ventanas, baños, cocina e instalaciones de plomería y electricidad, pero no evalúa escaleras, rampas y ascensores, entre otros...), el número de aulas que cumplen con los criterios de iluminación y ventilación adecuada, aspectos relacionados con la seguridad de las escuelas y los estudiantes, entre otros aspectos.

El Censo Escolar, por su parte, ofrece diversa información sobre la realidad escolar, presentando datos sobre escuelas, clases, matrícula y docentes. Aunque estos datos son importantes, por sí solos no revelan el estado de conservación de las escuelas ya que las variables de infraestructura disponibles en el Censo Escolar solo indican la presencia o ausencia de ciertos elementos.

El Censo Escolar (INEP, 2019) se aplica anualmente en todo Brasil, recopilando información sobre diversos aspectos de las escuelas brasileñas, en particular, matrícula e infraestructura. Participan todos los niveles educativos: infantil, primaria, secundaria y educación de jóvenes y adultos (EJA). Los datos de infraestructura se dividen en siete secciones: energía; servicios; dependencias; equipos; tecnología; accesibilidad y otros.

3. MÉTODO

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en tres etapas diferentes, como se muestra en la Figura 1.

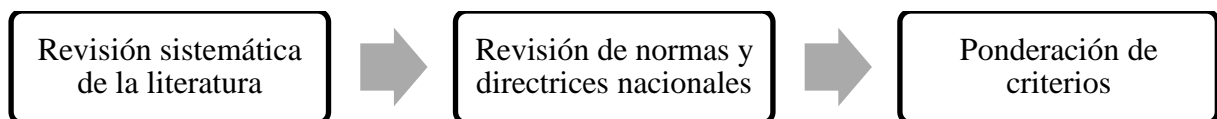


Figura 1. Pasos de la investigación. Fuente: Los autores.

3.1 Paso 1

En primer lugar, se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) de artículos científicos, buscando identificar qué criterios para evaluar el desempeño de los edificios escolares eran los más relevantes en el ámbito académico. De acuerdo con la investigación de Sampaio (2007), se definieron las siguientes partes para realizar la revisión de la literatura:

- 1) Definición de la pregunta: ¿qué criterios se utilizan para evaluar el desempeño de los edificios educativos?
- 2) Búsqueda de referencias – caracterizada por la definición de palabras clave y estrategias de búsqueda, además de la identificación de las bases de datos a consultar. En la tabla 01 se muestran las estrategias de búsqueda adoptadas. La búsqueda se realizó en cuatro bases de datos diferentes y se limitó a resultados en inglés y portugués. Además, la búsqueda se restringió a encontrar el término solo en el título, resumen y palabras clave de los documentos.

Tabla 1. Términos de búsqueda, fuentes utilizadas y respectivos resultados. Fuente: Los autores.

Término de búsqueda	Fuente	Resultados
“Educational Building Performance”	Scopus	88
	Periódicos CAPES	23
	Scielo	21
	Science Direct	188

3) Revisión y selección de estudios - Con base en los resultados encontrados anteriormente, se evaluaron y eliminaron los títulos de los documentos que no cumplieron con los criterios definidos para la realización de la investigación. A continuación, se analizaron los resúmenes de los artículos restantes y se seleccionaron aquellos que trataban sobre el desempeño en edificios educativos. Luego se excluyeron los documentos repetidos, y el resto de los artículos fueron leídos en su totalidad. La selección final excluyó documentos que no incluyeron criterios y parámetros para analizar el desempeño de los edificios. Mediante el procedimiento hacia atrás, en el que se consultan las referencias de estudios previamente seleccionados (DRESCH et al, 2015), Se ha añadido un artículo más a la revisión.

Después de la selección de los estudios, se realizó un análisis con el fin de identificar los criterios abordados en la investigación para evaluar el desempeño del edificio escolar. Los datos obtenidos se exponen en el apartado de resultados.

3.2 Paso 2

Tras analizar los trabajos académicos consultados en RSL, los autores encontraron que sería necesaria una búsqueda más exhaustiva para identificar qué criterios se deben utilizar para la evaluación de los edificios escolares. Para complementar la investigación, también se consultó a los siguientes:

- Normas nacionales;
- Directrices del gobierno federal;
- Instrumentos de evaluación para escuelas brasileñas;

La presentación y síntesis de los resultados obtenidos también se abordan en el apartado de Resultados y Discusión.

3.3 Paso 3

Para construir un marco de criterios más consistente, también se aplicó el método Delphi, en el que se seleccionaron especialistas que trabajan o han trabajado como ingenieros en alcaldías, cuyos perfiles se presentan en la Tabla 2. El objetivo de este paso fue hacer que los expertos llegaran a un consenso acerca de la importancia de los criterios identificados previamente y asignar calificaciones a los criterios.

Tabla 2. Perfil de los expertos que participaron en la etapa Delphi. Fuente: Los autores.

Experto	Ocupación	Tiempo de actuación con desempeño de edificios escolares.
A	Inspector de construcción	menos de 1 año
B	Inspector de construcción	menos de 3 años
C	Ingeniero Civil	menos de 3 años
D	Secretario de Obras (Jubilado)	más de 3 años
E	Ingeniero Civil	menos de 1 año
F	Supervisor de Infraestructura	más de 08 años

Para decidir si hubo o no consenso después de cada ronda, se utilizó la ecuación (1). (WILSON; PAN; SCHUMSKY, 2012):

$$CVR = (NE - N/2)/(N/2) \quad (1)$$

donde:

CVR = Content Validity Ratio (razón de validez del contenido);

NE = número de expertos que indican que un parámetro es esencial; y

N = número total de expertos que participan en la encuesta.

Se consideró consenso cuando el CVR fue mayor o igual a 0,29 y se suspendieron las rondas del método. La técnica se aplicó a través de cuestionarios en línea, en tres rondas. En la primera, los expertos recibieron un cuestionario con la lista de criterios obtenidos en el paso anterior, y deberían indicar su importancia en una escala del 1 al 4 (donde 1 significa poco importante y 4 muy importante). Esta escala se adoptó para evitar el término neutro intermedio (3), de la escala de cinco puntos, que en experiencias anteriores demostró ser una opción para la indecisión en los cuestionarios. Si juzgaban que el criterio no era relevante en la evaluación, se podía marcar la opción N/A (no aplicable). En la segunda ronda, se presentaron las medias obtenidas a través del cuestionario anterior, y se invitó a los expertos a reevaluar algunos criterios, cuyo consenso no fue alcanzado en la primera ronda. Finalmente, la tercera ronda presentó los resultados obtenidos en la etapa anterior y, solo para los criterios en los que aún no había consenso, se realizó una nueva reevaluación.

4. RESULTADOS E DISCUSIÓN

4.1 Paso 1

Esta etapa del trabajo se basa en los resultados de la revisión de la literatura sobre los criterios importantes para la evaluación de las unidades escolares. Los trabajos académicos consultados, resultantes de la revisión de la literatura, se enumeran en la Tabla 3, de acuerdo con los criterios identificados.

Tabla 3. Artículos consultados en la Revisión de Literatura. Fuente: Los autores.

Referencia	Criterios
Michael, Heracleous (2017)	Niveles de iluminación, distribución de la luz, condiciones de confort visual, necesidad de utilizar iluminación artificial
Khalil et al. (2016)	Espacios, orientación de ventanas, infraestructura, accesos, áreas de circulación, ergonomía, señalización, salidas de emergencia, probabilidad de contaminación de usuarios, áreas comunes, materiales, estabilidad estructural, sistemas de información en automatización de edificios, servicios eléctricos y de plomería, prevención de incendios, techo, ascensores, confort térmico, iluminación artificial y natural, eliminación de basura, ventilación, confort acústico, limpieza
Driza, Park (2013)	Desempeño de los sistemas de agua y electricidad
Khalil et al. (2012)	Accesibilidad en los edificios, ubicación, percepción de los usuarios sobre los problemas del edificio
Mijakowski, Sowa (2017)	Ventilación interior, temperatura, humedad y concentración de CO ₂ en interiores
El Asmar et al. (2014)	Diseño, mobiliario, confort térmico, calidad del aire interior, iluminación, confort acústico, eficiencia hidráulica, limpieza y mantenimiento
Zomorodian, Tahsildoost (2014)	Confort térmico y visual
Bonomolo et al. (2017)	Iluminación natural
Pellegrino et al. (2015)	Orientación de ventanas, obstrucciones externas, dimensiones, área de ventanas, profundidad del aula, cortinas y persianas, propiedades de reflectancia y vista externa.
Wang, Zamri (2013)	Confort térmico, acústico, calidad del aire interior, disposición del aula, iluminación
Karima, Altan (2016)	sistemas de iluminación, calefacción, aire acondicionado, iluminación natural, sistemas de seguridad
Ali et al. (2016)	Temperatura de la superficie, humedad relativa del aire, intensidad de la luz, concentración interna de CO ₂
Khalil et al. (2011)	Confort visual y térmico, ventilación
El Darwish, El-Gendy (2018)	Temperatura del aire, humedad relativa, temperatura radiante, velocidad del aire
Ropi, Tabassi (2014)	Análisis de estado de baños, techos, puertas, estructuras, paredes y techos
Wong, Jan (2003)	Confort térmico, espacial, visual, acústico, calidad del aire interior e integridad del edificio

4.2 Paso 2

En esta etapa se consultaron las normas y directrices oficiales, que podrían ayudar en la elaboración de una lista de criterios para la evaluación de edificios escolares. En la tabla 4 se enumeran las normas y directrices consultadas.

Tabla 4. Normas y directrices consultados en la identificación de criterios de evaluación de edificios escolares. Fuente: Los autores.

Normas	Directrices del gobierno		Instrumentos de evaluación para escuelas brasileñas
Normas de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT)	1	Manual de Orientações Técnicas - v.2: Elaboração de projetos de edificações escolares: educação infantil (MEC, 2017)	Censo Escolar (2019)
	2	Caderno de Requisitos e Critérios de Desempenho para Estabelecimentos de Ensino Público (MEC, 2014)	
	3	Manual técnico de arquitetura e engenharia de Orientação para elaboração de projetos de construção de Centros de educação Infantil. (MEC, 2009)	
	4	Padrões mínimos de funcionamento da escola do ensino fundamental: manual de implantação. (MEC, 2006a)	Prova Brasil (2017)
	5	Parâmetros básicos de infraestrutura para instituições de educação infantil. Brasília. (MEC, 2006b)	
	6	Manual para Adequação de Prédios Escolares - Ministério da Educação MEC (2005)	

Las normas, directrices y trabajos académicos identificados en los Pasos 1 y 2 fueron sometidos a análisis de contenido, y se percibió que no existe un estándar para organizar los criterios identificados. De esta manera, los autores crearon su propia estructura, buscando organizarlos en grupos que se relacionen entre sí. Se identificaron 70 criterios, agrupados en 11 categorías, como se muestra en la Tabla 5. Esta tabla también presenta los estándares ABNT relacionados con los criterios identificados en la revisión sistemática de la literatura.

Tabla 5. Criterios, normas y directrices para la evaluación de edificios escolares. Fuente: Los autores.

Categoría	Nº	Criterio	Norma NBR	Directriz del gobierno						Censo Escolar	Prova Brasil
				1	2	3	4	5	6		
Instalaciones	1	Cubierta	15575-5	x	x	x	x		x		x
	2	Paredes	15575-4	x	x	x	x	x	x		x
	3	Canchas deportivas		x	x		x			x	x
	4	Patios de recreo	16071-2	x			x			x	
	5	Portones, barrotes y muro			x	x	x	x			

	6	Áreas no pavimentadas		x								
	7	Muebles	14006	x	x	x	x	x	x			
	8	Estructuras	6118	x	x	x	x		x			
	9	Estacionamiento		x	x	x			x			
	10	Escaleras	9077	x	x	x						
	11	Rampas	9050	x	x	x			x			
	12	Ascensores	13994			x			x			
Acabados	13	Pintura de paredes	13245	x	x	x	x	x	x			
	14	Revestimientos	16919	x	x	x	x	x	x			
	15	Pisos	15575-3	x	x	x	x	x	x			x
	16	Enchufes	14136	x	x	x	x		x			
	17	Metales	10283	x	x	x			x			
	18	Puertas y ventanas	10821/ 10831	x	x	x	x	x	x			x
	19	Recubrimiento del techo	14285/ 16382	x	x	x	x		x			
	20	Artículos sanitarios	15097	x	x	x			x			
Seguridad contra incendios	21	Extintores	12693	x		x			x			x
	22	Rutas de escape	9077	x	x				x			
	23	Señalización	13434	x	x	x			x			
Confort térmico	24	Adecuación de paredes	15220-2	x	x		x	x	x			
	25	Aislamiento térmico del techo.	15220-2	x	x	x		x	x			
	26	Aberturas de ventilación	15575-4	x	x	x	x	x	x			x
	27	Humedad en los ambientes		x	x	x		x				
Confort acústico	28	Aislamiento acústico de paredes.	15575-4	x	x	x		x				
	29	Polución sonora	10151	x	x	x		x				
Confort visual	30	Iluminación natural	15215	x	x	x	x	x	x			x
	31	Iluminación artificial	5413	x	x	x	x	x	x			x
Infraestructura	32	Instalaciones de agua	5626	x	x	x	x	x	x		x	x
	33	Instalaciones de alcantarillado	8160	x	x	x	x	x	x		x	
	34	Sistema de agua de lluvia	10844	x	x	x	x	x				

	35	Instalaciones eléctricas	5410	x	x	x	x	x	x	x	x
	36	Sistemas de telecomunicaciones	14691	x		x			x		
Sostenibilidad	37	Eficiencia energética	ISO 50001		x	x			x		
	38	Sistemas de gestión medioambiental	ISO 14001	x	x	x			x		
	39	Destino de residuos		x	x	x			x		x
	40	Gestión de captación de agua de lluvia	15527	x	x				x		
Habitabilidad	41	Altura del pie derecho	15575	x	x	x	x			x	
	42	Estanqueidad a fuentes de humedad	9575	x	x	x					
	43	Señales de depredación									x
	44	Contaminantes en la atmósfera interior		x	x						
	45	Adecuación para personas con movilidad reducida (PMR)	9050	x	x	x			x	x	x
	46	Nivel de limpieza del entorno		x	x	x			x	x	
	47	Estética del edificio		x					x	x	
	48	Ubicación de la escuela		x	x	x			x		x
Seguridad (da escuela y del alumno)	49	Control de entrada y salida de alumnos									x
	50	Control la entrada de extraños a la escuela					x			x	x
	51	Vigilancia durante el día					x				x
	52	Vigilancia durante la noche					x				x
	53	Vigilancia los fines de semana y festivos					x				x

4.3 Paso 3

Para determinar la importancia de cada uno de los criterios se aplicó el método Delphi a un grupo de expertos. Los expertos evaluaron, en una escala de 1 a 4, los criterios presentados en la Tabla 5. Para esta investigación se estableció un máximo de tres rondas Delphi, con o sin consenso entre los expertos, sin embargo, en la tercera ronda se alcanzó un consenso. La Tabla 6 presenta los resultados de la aplicación de Delphi, que consiste en la media de las notas atribuidas a cada criterio, por los evaluadores.

Tabla 6. Ponderación de criterios para evaluar edificios escolares. Fuente: Los autores.

Categoría	Nº	Criterio	Nota Delphi
Instalaciones	1	Cubierta	4,0
	2	Paredes	3,2
	3	Canchas deportivas	3,0
	4	Patios de recreo	2,5
	5	Portones, barrotes y muro	3,2
	6	Áreas no pavimentadas	1,7
	7	Muebles	3,3
	8	Estructuras	3,7
	9	Estacionamiento	1,0
	10	Escaleras	3,0
	11	Rampas	3,5
	12	Ascensores	1,8
Acabados	13	Pintura de paredes	2,7
	14	Revestimientos	3,0
	15	Pisos	3,7
	16	Enchufes	3,7
	17	Metales	3,0
	18	Puertas y ventanas	3,3
	19	Recubrimiento del techo	3,3
	20	Artículos sanitarios	3,0
Seguridad contra incendios	21	Extintores	3,8
	22	Rutas de escape	4,0
	23	Señalización	4,0
Confort térmico	24	Adecuación de paredes	2,3
	25	Aislamiento térmico del techo.	3,3
	26	Aberturas de ventilación	4,0
	27	Humedad en los ambientes	3,3
Confort acústico	28	Aislamiento acústico de paredes.	2,8
	29	Polución sonora	3,3
Confort visual	30	Iluminación natural	3,7
	31	Iluminación artificial	3,8

Infraestructura	32	Instalaciones de agua	3,2
	33	Instalaciones de alcantarillado	3,0
	34	Sistema de agua de lluvia	2,8
	35	Instalaciones eléctricas	3,8
	36	Sistemas de telecomunicaciones	2,8
Sostenibilidad	37	Eficiencia energética	3,3
	38	Sistemas de gestión medioambiental	2,7
	39	Destino de residuos	3,8
	40	Gestión de captación de agua de lluvia	2,8
Habitabilidad	41	Altura del pie derecho	3,3
	42	Estanqueidad a fuentes de humedad	4,0
	43	Señales de depredación	3,3
	44	Contaminantes en la atmósfera interior	2,7
	45	Adecuación para personas con movilidad reducida (PMR)	3,8
	46	Nivel de limpieza del entorno	3,7
	47	Estética del edificio	2,7
	48	Ubicación de la escuela	2,2
Seguridad (da escuela y del alumno)	49	Control de entrada y salida de alumnos	3,8
	50	Control la entrada de extraños a la escuela	4,0
	51	Vigilancia durante el día	2,8
	52	Vigilancia durante la noche	3,7
	53	Vigilancia los fines de semana y festivos	3,3
	54	Esquema policial para inhibir hurtos, robos y otras formas de violencia.	3,3
	55	Esquema policial para inhibir el narcotráfico dentro de la escuela	3,5
	56	Esquema policial para inhibir el narcotráfico en las inmediaciones de la escuela	3,3
	57	Iluminación exterior de la escuela	3,7
	58	Mecanismos de protección para equipos más caros	3,3
Ambientes	59	Seguridad en tu entorno	3,3
	60	Aula	4,0
	61	Salas administrativas	3,0
	62	Sala de profesores	3,3
	63	Salas de informática	3,5
	64	Laboratorios	3,5
	65	Refectorio	4,0
	66	Depósito de material de limpieza (DML)	2,7
	67	Cocina	3,7
	68	Patio	3,2
	69	Biblioteca	3,2
	70	Baños	4,0

En la evaluación de las instalaciones escolares, los elementos de construcción identificados como importantes a partir de la consulta de expertos son: cubierta, estructura, paredes, portones, barrotes y muros, mobiliario, canchas deportivas, escaleras y rampas, todos con calificaciones mayores a 3. Los demás criterios, mencionados en la LSR y en las normas y directrices consultados, Los demás criterios, mencionados en la LSR y en las normas y directrices consultadas, no fueron considerados por los especialistas como elementos importantes para evaluar el desempeño del edificio escolar. En cuanto a la categoría de acabados, los criterios se consideraron (revestimientos, pisos, enchufes, metales, ventana y puertas, techos artículos sanitarios), solo la pintura de las paredes obtuvo una puntuación inferior a 3.

Las categorías de "Confort térmico, acústico y lumínico" se consideran generalmente criterios importantes en la evaluación del desempeño de los edificios, aunque los criterios de aislamiento térmico y acústico de las paredes reciben puntuaciones inferiores a 3.

La categoría "Seguridad contra Incendios", elemento indispensable en el Sistema de Prevención y Lucha contra Incendios y Pánico, es unánime en cuanto a importancia, en opinión de los expertos. Las instalaciones eléctricas e hidrosanitarias son los criterios destacados en la categoría de infraestructura.

En cuanto a las categorías de Sostenibilidad y Habitabilidad, destacan los criterios de "eficiencia energética", "destinación de residuos", "altura del pie derecho", "estanqueidad a las fuentes de humedad", "señales de depredación", "adecuación para personas con movilidad reducida (PMR)" e "nivel de limpieza de los ambientes".

En general, los aspectos de seguridad de la instalación, propiedad y física de los ocupantes, categoría "Seguridad escolar y de los estudiantes", a pesar de ser importante en la evaluación de los expertos, fue mencionada solo en la evaluación de Prova Brasil. Se entiende que este criterio no está relacionado con la estructura del edificio, sino con su funcionamiento.

Para los ambientes mencionados en los estudios de la RSL y en las normas y lineamientos, se les asignó una categoría exclusiva, ya que no son criterios, pero son lo suficientemente importantes como para componer la evaluación del edificio. El ambiente menos importante es el DML. Este ambiente está relacionado con la limpieza e higiene de la escuela, sin embargo, se menciona solo en un instrumento de evaluación escolar y para los especialistas tiene una puntuación de 2.7 en una escala de 1 a 4.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Dado que el edificio escolar es el principal activo del proceso de aprendizaje y se espera que ofrezca ambientes de calidad y seguridad a los usuarios, este artículo tuvo como objetivo identificar, a través de una revisión de la literatura, de directrices gubernamentales y de consulta con expertos, los criterios utilizados en las investigaciones para evaluar el desempeño de los edificios escolares. Se identificaron 70 criterios, que se agruparon en 11 categorías según sus correlaciones: instalaciones, acabados, seguridad contra incendios, confort térmico, acústico y visual, infraestructura, sustentabilidad, habitabilidad, seguridad (de la escuela y del alumno) y ambientes. Se observó con la investigación que las normas y directrices brasileñas en relación al desempeño y conservación de las escuelas están muy desfasadas, Algunas normas tienen más de 20 años, lo que apunta a la necesidad de revisar estas directrices, para garantizar el desempeño de estos edificios, evitando que defectos y manifestaciones patológicas comprometan la infraestructura escolar, especialmente ahora con las consecuencias de la pandemia vivida en los últimos dos años. Considerando que en Brasil no existen normas específicas para la evaluación de edificios escolares, la identificación y ponderación de criterios que permitan tal evaluación, tal como se presenta en el estudio, es un primer paso y contribuye al desarrollo de técnicas y métodos de evaluación, que posteriormente pueden componer un estándar de desempeño para los edificios escolares. Como

sugerencia para trabajos futuros, se indica una revisión de la literatura para identificar métodos de evaluación de los criterios presentados en esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Ali, A. S., Keong, K. C., Zakaria, N., Zolkafli, U., Akashah, F. (2013). The effect of design on maintenance for school buildings in Penang, Malaysia. *Structural Survey*. <https://doi.org/10.1108/SS-10-2012-0030>
- Ali, A. S., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B. (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, 100, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>
- Asiyai, R. I. (2012). Assessing school facilities in public secondary schools in Delta State, Nigeria. *African research review*, 6(2), 192-205. <https://doi.org/10.4314/afrrrev.v6i2.17>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. CB-002 - Comitê Brasileiro da Construção Civil. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/cb-02>>. Acessado em 20/05/2020.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). *NBR 10821. Esquadrias para edificações Parte 2: Esquadrias externas - Requisitos e classificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 10831: Projeto e utilização de caixilhos para edificações de uso residencial e comercial – Janelas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). *NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 12693: Sistemas de proteção por extintores de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 13245: Tintas para construção civil — Execução de pinturas em edificações não industriais — Preparação de superfície*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). *NBR 13434: Sinalização de segurança contra incêndio e pânico - Parte 2: Símbolos e suas formas, dimensões e cores*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 16919: Placas cerâmicas - Determinação do coeficiente de atrito*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 14037: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – Requisito para elaboração e apresentação dos conteúdos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). *NBR 16071-2: Playgrounds Parte 2: Requisitos de segurança*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15215-1: Iluminação natural - Parte 1: Conceitos básicos e definições*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-2: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os Sistemas Estruturais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-3: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-4: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os Sistemas de Vedações Verticais internas e externas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-5: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 5: Requisitos para os Sistemas de Coberturas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 16071-1: Playgrounds - Parte 1: Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 16280: Reforma em edificações – Sistema de gestão de reformas – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 16747: Inspeção predial – Diretrizes, conceitos, terminologia, requisitos e procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 5626: Instalação predial de água fria*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 5674: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção*. 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 (1998). *NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999). *NBR 8160: Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983). *NBR 8214: Assentamento de azulejos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9077. Saídas de emergência em edifícios (em revisão)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *NBR 9575. Impermeabilização - Seleção e projeto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso*. Rio de Janeiro.
- Beauregard, M. A., Ayer, S. K. (2018). Maintaining performance: Understanding the relationship between facility management and academic performance at K-12 schools in the State of Arizona. *Facilities*. Vol. 36 No. 11/12, pp. 618-634. <https://doi.org/10.1108/F-11-2017-0111>
- Bonomolo, M., Baglivo, C., Bianco, G., Congedo, P. M., Beccali, M. (2017). Cost optimal analysis of lighting retrofit scenarios in educational buildings in Italy. *Energy Procedia*, 126, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.137>
- Boothman, C., Higham, A., Horsfall, B. (2012). Attaining zero defects within building schools for the future: a realistic target or a Sisyphean task?. In *Proceedings 28th Annual ARCOM Conference* (3-5). Disponível em: https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2012-0991-1001_Boothman_Higham_Horsfall.pdf
- Cardoso, T. A. (2017). *Estruturação do processo decisório para reforma de edificações escolares públicas do ensino fundamental utilizando o método multicritério de apoio à decisão – construtivista (MCDA-C)*. 223f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.
- Dresch, A., Lacerda, D. P., Júnior, J. A. V. A. (2015). *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Bookman Editora.
- Driza, P. J. N., Park, N. K. (2013). Actual energy and water performance in LEED-certified educational buildings. *Sustainability: The Journal of Record*, 6(4), 227-232.

<https://doi.org/10.1089/SUS.2013.9850>

El Asmar, M., Chokor, A., Srour, I. (2014). Are building occupants satisfied with indoor environmental quality of higher education facilities? *Energy procedia*, 50, 751-760.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.093>

El-Darwish, I. I., El-Gendy, R. A. (2018). Post occupancy evaluation of thermal comfort in higher educational buildings in a hot arid climate. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 3167-3177.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.11.008>

Gomes, A., Regis, A. (2012). Desempenho e infraestrutura: mapeamento das escolas públicas da região metropolitana do Rio de Janeiro. In *Congresso Ibero-americano de Política e Administração da Educação* (Vol. 3). Disponível em: https://www.anpae.org.br/iberoamericano2012/Trabalhos/AdaildaGomesDeOliveira_res_int_GT_1.pdf.

Hassanain, M. A., Iftikhar, A. (2015). Framework model for post-occupancy evaluation of school facilities. *Structural Survey*. Vol. 33 No. 4/5, pp. 322-336. <https://doi.org/10.1108/SS-06-2015-0029>

Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP). *Censo Escolar*. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/guest/censo-escolar>> Acessado em 26 nov. 2019.

Karima, M., Altan, H. (2017). Interactive building environments: A case study university building in UAE. *Procedia Engineering*, 180, 1355-1362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.298>

Khalil, N., Husin, H. N., Nawawi, A. H. (2012). An analytical literature: Strategic improvement of sustainable building performance tool for Malaysia's Higher Institutions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 36, 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.034>

Khalil, N., Husin, H. N., Wahab, L. A., Kamal, K. S., Mahat, N. (2011). Performance Evaluation of Indoor Environment towards Sustainability for Higher Educational Buildings. *Online Submission*. US-China Education Review A 2 p188-195 2011. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED524814>

Khalil, N., Kamaruzzaman, S. N., Baharum, M. R. (2016). Ranking the indicators of building performance and the users' risk via Analytical Hierarchy Process (AHP): Case of Malaysia. *Ecological Indicators*, 71, 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.032>

Koleoso, H., Omirin, M., Adewunmi, Y., Babawale, G. (2013), "Applicability of existing performance evaluation tools and concepts to the Nigerian facilities management practice". *International Journal of Strategic Property Management*, 17(4), 361-376. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2013.861367>

Marques, B. A., de Brito, J., Correia, J. R. (2015). Constructive characteristics and degradation condition of Liceu secondary schools in Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(7), 896-911. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.865814>

Michael, A., Heracleous, C. (2017). Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. *Energy and Buildings*, 140, 443-457. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.087>

Mijakowski, M., Sowa, J. (2017). An attempt to improve indoor environment by installing humidity-sensitive air inlets in a naturally ventilated kindergarten building. *Building and Environment*, 111, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.013>

Ministério da Educação (2014). *Diretrizes Técnicas para Apresentação de Projetos e Construção de Estabelecimentos de Ensino Público*. Caderno de Requisitos e Critérios de Desempenho para Estabelecimentos de Ensino Público, vol. 1. Programa PROINFÂNCIA.

Ministério da Educação (2017). *Manual de Orientações Técnicas - v.2: Elaboração de projetos de edificações escolares: educação infantil*. Brasília.

- Ministério da Educação (2005). *Manual para Adequação de Prédios Escolares*. 5a Ed./Elaboração Carlos Alberto Araújo Guimarães, Cláudia Maria Videres Trajano, Erinaldo Vitório, Rodolfo Oliveira Costa, Willamy Mamede da Silva Dias – Brasília: Fundescola/DIPRO/FNDE/MEC.
- Ministério da Educação (2009). *Manual técnico de arquitetura e engenharia de Orientação para elaboração de projetos de construção de Centros de educação Infantil*. Elaboração Karen Gama Muller, Luiz Paulo Ferrero Filho, Débora Carvalho Diniz –Brasília.
- Ministério da Educação (2006a). *Padrões mínimos de funcionamento da escola do ensino fundamental: manual de implantação*. 2a impressão. Brasília.
- Ministério da Educação (2006b). *Parâmetros básicos de infra-estrutura para instituições de educação infantil*. Brasília.
- Mojela, W., Thwala, W. D. (2014). Maintenance of Public Schools Infrastructure in South Africa. In *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 1253-1261). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35548-6_127
- Mydin, M. O., Salim, N. A., Tan, S. W., Tawil, N. M., Ulang, N. M. (2014). Assessment of significant causes to school building defects. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 3, p. 01002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20140301002>
- Norazman, N., Asma, N. S., Nashruddin, M., Irfan, A., Ani, C., Norhaslina, J. F., Muhamad, K. A. (2019). School Building Defects: Impacts Teaching and Learning Environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 22-29. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1005.0782S219>
- Pellegrino, A., Cammarano, S., Savio, V. (2015). Daylighting for Green schools: A resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments. *Energy Procedia*, 78, 3162-3167. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.774>
- QEDU. (2018). *Infraestrutura: Dependências em escolas públicas de ensino fundamental regular*. Disponível em: <https://www.qedu.org.br/brasil/censo-escolar?year=2018&dependence=0&localization=0&education_stage=0&item=> Acessado em: 06/05/2020.
- Ropi, R. M., Tabassi, A. A. (2014). Study on maintenance practices for school buildings in Terengganu and Kedah, Malaysia. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 10, p. 03003). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20141003003>
- Shehab, T., Noureddine, A. (2014). Prioritization Model for Rehabilitation of Public School Buildings in California. *International Journal of Construction Education and Research*, 10(1), 58-75. <https://doi.org/10.1080/15578771.2013.805344>
- Sistema de Avaliação da Educação Básica (2017). *Questionário da Escola*. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/guest/educacao-basica/saeb/instrumentos-de-avaliacao>>. Acesso em 20 abr. 2020
- Soares Neto, J. J., De Jesus, G. R., Karino, C. A., De Andrade, D. F. (2013). Uma escala para medir a infraestrutura escolar. *Estudos em Avaliação Educacional*, 24(54), 78-99. <https://doi.org/10.18222/eae245420131903>
- Sotsek, N. C., Leitner, D. S., Lacerda Santos, A. de P. (2018). Uma revisão sistemática dos critérios do Building Performance Evaluation (BPE). *Revista ALCONPAT*, 9(1), 1 - 14. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i1.260>
- Tan, S. W., Mydin, M. O., Sani, N. M., Sulieman, M. Z. (2014). Investigation into Common Decay of Educational Buildings in Malaysia. In *MATEC Web Of Conferences* (Vol. 10, p. 05001). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20141005001>

- Wang, C. C., Zamri, M. A. (2013). Effect of IEQ on occupant satisfaction and study/work performance in a green educational building: a case study. In *ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability* (pp. 234-246). <https://doi.org/10.1061/9780784413135.022>
- Wilson, F. R., Pan, W., Sschumsky, D. A. (2012). Recalculation of the critical values for Lawshe's content validity ratio. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, 45(3), 197-210. <https://doi.org/10.1177/0748175612440286>
- Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M. (2017). Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. *Energy and Buildings*, 134, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.018>

Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos

A. Moreno^{1*} , C. Ponce² , E. Múzquiz¹ , F. Avalos¹ 

*Autor de Contacto: nicolas.moreno@uadec.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>

Recepción: 17/11/2020 | Aceptación: 19/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo hacer una revisión de los trabajos realizados usando polvo de mármol como sustitución de cemento, arena o agregado fino en concreto, mortero y ladrillos. Se revisaron investigaciones realizadas en varias partes del mundo con procedimientos experimentales diferentes. Se concluye que el polvo de mármol se puede usar como sustituto parcial de cemento o agregado fino (hasta por un 15 %, dependiendo del material a sustituir), sin afectar la resistencia a compresión de las muestras o las piezas, y sin importar la forma. Por lo tanto, el polvo de mármol no solo ayuda a aminorar la contaminación que genera, sino que también a la reducción de uso como arena y polvillo, aportando al desarrollo sustentable.

Palabras clave: polvo de mármol; ladrillo; mortero; concreto; cemento.

Citar como: Moreno, A., Ponce P., Múzquiz, E., Avalos, F. (2022), “Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 162 – 183, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>

¹ Facultad de Ciencias Químicas Unidad Saltillo, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza y José Cárdenas Valdés, C.P. 25280, Saltillo, México.

² Escuela de Arquitectura Unidad Torreón, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera Torreón - Matamoros km. 7.5. Ejido El Águila. Ciudad Universitaria. C.P. 27087. Torreón, Coahuila

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Moreno, A. contribuyó con la conceptualización de la actividad, la investigación, la metodología, la recopilación de datos y la redacción del borrador original en un 50%. El autor Ponce, C. contribuyó a la validación, redacción, revisión y edición en un 40%. El autor Múzquiz, E. contribuyó a la validación, redacción, revisión y edición en un 5%. El autor Avalos, F., contribuyó a la recopilación de datos, redacción, revisión y edición en un 5%.

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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Marble residues in construction materials: a review of the use of marble dust in mortars, concrete and bricks

ABSTRACT

The objective of this work is to make a review of the results carried out using marble powder as a substitute for cement, sand, or fine aggregate in concrete, mortar, and bricks. Research carried out in various parts of the world with different experimental procedures was reviewed. It is concluded that marble powder can be used as a partial substitute for cement or fine aggregate (up to 15%, depending on the material to be replaced) without affecting the compressive strength of the samples or pieces regardless of their shape. Therefore, marble powder not only helps to reduce the pollution it generates but also to reduce its use as sand and powder, contributing to sustainable development.

Keywords: marble dust; brick; mortar; concrete; cement.

Resíduos de mármore em materiais de construção: uma revisão do uso do pó de mármore em argamassas, concreto e tijolos

RESUMO

O objetivo deste trabalho é fazer uma revisão dos trabalhos realizados utilizando pó de mármore como substituto do cimento, areia ou agregado miúdo em concreto, argamassa e tijolos. Pesquisas realizadas em várias partes do mundo com diferentes procedimentos experimentais foram revisadas. Conclui-se que o pó de mármore pode ser utilizado como substituto parcial do cimento ou agregado miúdo (até 15%, dependendo do material a ser substituído), sem afetar a resistência à compressão das amostras ou peças independentemente de sua forma. Portanto, o pó de mármore não só ajuda a reduzir a poluição que gera, mas também reduz seu uso como areia e pó, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: pó de mármore; tijolo; argamassa; concreto; cimento.

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 mármol es una roca metamórfica compuesta por carbonatos. En términos comerciales, la palabra mármol no tiene un sentido petrológico, en ocasiones se aplica el término a rocas como tobas, serpentinas y granito, aunque a menudo se refiere a rocas calcáreas como calizas recristalizadas, dolomías, mármol, ónix y travertino (Coordinación General de Minería, 2014).

Según los datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en 2018, México es uno de los mayores productores a nivel mundial de varios minerales no metálicos. En 2019 la Dirección General de Minas (DGM) reportó un aumento de 4,663 millones de pesos del 2017 al 2018 en la producción nacional de los minerales no metálicos, lo que representa un incremento del 23.9% (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

China, India y otros países, incluido México, son los principales productores de roca dimensionable. La roca dimensionable incluye una amplia variedad de rocas, dentro de las cuales se puede mencionar el granito, calizas y mármol.

El proceso de producción del mármol comienza con la extracción de la roca por medios mecánicos (sierras), generando bloques de gran tamaño, los que posteriormente serán divididos en tamaños menores para su comercialización. A este proceso se le conoce como laminación.

El proceso de laminado consiste en cortar el bloque de roca para obtener placas de 2 a 3 cm de espesor, y se realiza utilizando sierras con incrustaciones de diamante, después, la placa obtenida se somete a un pulido para desbastar las partes rugosas de la roca y abrillantar por medio de abrasivos y agua. Terminado el pulido, las placas se someten a cortes para dimensionarla a necesidad del cliente, de igual manera, para cumplir con los requerimientos del cliente, el producto se somete a un proceso de biselado, secado o bien encerado, por último, el empaque y el embarque del producto para su comercialización nacional o internacional (Coordinación General de Minería, 2014).

Una tonelada de piedra de mármol procesada por cortes verticales y horizontales para la producción de bloque y laminación produce entre un 35% a 45% de vertidos o lechadas de materiales no utilizados, (Singh, et al., 2017).

Esta lechada de desechos, especialmente después de secarse, causa riesgos ambientales como la contaminación por polvo, que ocupa tierras agrícolas y otras áreas cercanas, lo que las vuelve infértiles. (Singh, et al., 2017). En 2017, la producción mundial de mármol fue de 2,352,614 toneladas (Servicio Geológico Mexicano, 2019), entonces se generaron 941,045 toneladas de desecho, considerando un 40% del producto procesado.

Debido al gran problema que genera el polvo de mármol (resguardo de desechos, contaminación por óxido de calcio (CaO), el cual es absorbido por el suelo, provocando que se vuelva infértil), se han realizado investigaciones científicas para su aplicación en el sector de la construcción, ya sea como sustituto de cemento en morteros o concretos o también como fabricados de bloques o ladrillos aplicables a los sistemas constructivos en diversas partes del mundo.

En este trabajo se hace una revisión de los trabajos realizados usando polvo de mármol como sustitución de cemento, arena o agregado fino en concreto, mortero y ladrillos, con el objeto de reportar las formas en las que puede sustituir cemento o agregado fino para fabricar ladrillos no estructurales, entre otras contribuciones.

2. POLVO DE MÁRMOL COMO INSUMO EN LA CONSTRUCCIÓN

En este apartado se evalúa el uso del polvo de mármol como insumo en la construcción, se realiza una revisión exhaustiva de artículos publicados, se exponen de manera concisa y detallada los resultados de cada estudio de la aplicación del polvo de mármol en: cemento, mortero, concreto y ladrillos.

2.1 El polvo de mármol como sustituto parcial de cemento.

El polvo de mármol presenta un alto contenido de Carbonato de Calcio (CaCO_3), el cual se puede adicionar a morteros y concretos base cemento Portland para aumentar la vida útil, funcionando éste como rellenedor de poros. (Singh, et al., 2017).

Otros autores, por el contrario, piensan que la sustitución parcial de CaCO_3 produce modificaciones químicas, que se traducen en cambios en las propiedades mecánicas y físicas del cemento (Tobón & Kazes Gómez, 2008).

Se han realizado adiciones de entre el 3 y 5% de polvo de mármol a pastas de cemento Portland, y no se han presentado modificaciones en su comportamiento mecánico.

El-Sayed, Farag, Kandeel, Younes, y Yousef (2016) sustituyeron el 3, 4 y 5 % del peso del cemento con polvo de mármol, observando que, por la alta presencia de carbonato de calcio, no afectó las propiedades del cemento. Con las pastas de cemento endurecido se realizaron pruebas a compresión a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, se observó que las resistencias aumentaron proporcionalmente a la edad de curado de 1 a 28 días, como se muestra en la Figura 1

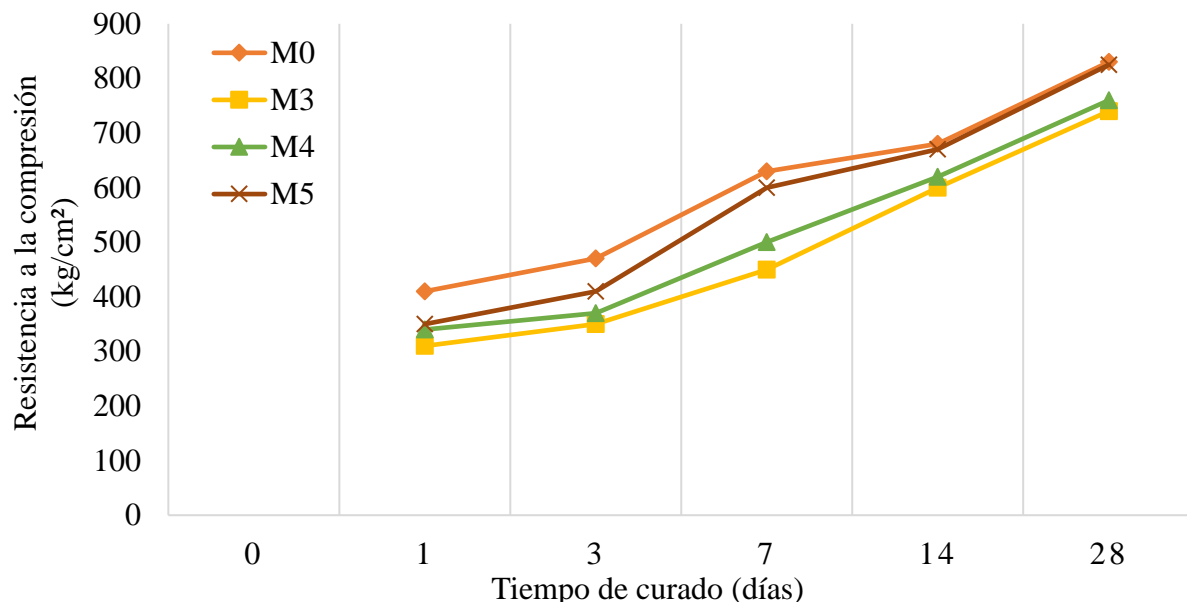


Figura 1. Resistencia a la compresión de las pastas de cemento Portland endurecidas que incorporan 3%(M3), 4% (M4) y 5%(M5) de residuos de polvo de mármol versus tiempo de curado (El-Sayed, et al., 2016)

Se mostró que el espécimen con 5% (M5) de polvo de mármol, a los 28 días de curado, obtuvo la misma resistencia a la compresión que la muestra control de cemento Portland ordinario sin adiciones.

Las otras muestras de 3 y 4 % de sustitución de cemento por polvo de mármol tienen una resistencia a la compresión menor en comparación con la M5 y M0.

Con esto, el aprovechamiento del polvo de mármol en la industria del cemento se vuelve factible por los beneficios económicos y ecológicos que representa el uso de un deshecho.

Singh, et al., (2017), menciona que el polvo de mármol tiene un alto contenido de Carbonato de Calcio (CaCO_3) y esto ayuda a incrementar la vida útil de pastas y concretos base cemento, mientras que Tobón & Kazes Gómez, (2008) mencionan lo contrario. El-Sayed, Farag, Kandeel, Younes, y Yousef (2016), muestran que sustituir polvo de mármol por cemento en pequeñas cantidades no afecta la resistencia a la compresión.

En estos trabajos se demuestra que la resistencia a la compresión de los especímenes no se ve afectada cuando se sustituye como máximo el 5% de polvo de mármol por cemento. Se observa en

las gráficas de resultado de ensayos que el incremento de resistencia es similar en los especímenes que tienen polvo de mármol y los que no lo tienen.

2.2 El polvo de mármol y su aplicación en morteros.

Los morteros base cemento Portland son de los materiales compuestos más utilizados en la industria de la construcción, y el cemento es el material de la construcción que genera más contaminación de CO₂ al ambiente en su proceso de fabricación. Por esta razón los investigadores han llevado a cabo estudios experimentales haciendo sustitución parcial al cemento por polvo de mármol para reducir su uso.

Corinaldesi, Moriconi y Naik (2010) sustituyeron el 10 % de cemento por polvo de mármol de una muestra de referencia y en una segunda opción sustituyeron el 10 % del agregado fino del mortero (arena), como se muestra en la Tabla 1. Se fabricaron de cada mezcla, 3 barras de 40 x 40 x 160 mm de donde se obtuvieron cubos de 40 mm por lado, para realizar ensayos a compresión a 3, 7, 28 y 56 días de curado.

Tabla 1. Proporciones de mortero (Corinaldesi, et al., 2010)

Mezcla	Ref	10% Cemento	10% Arena
A/C	0.61	0.68	0.59
Agua (kg/m ³)	275	276	266
Cemento (kg/m ³)	450	405	450
Arena (kg/m ³)	1350	1350	1215
Polvo de mármol (kg/m ³)	0	45	135

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2, se observa que la mezcla con remplazo de 10% de cemento por polvo de mármol mostró reducción en la resistencia a la compresión. Sin embargo, el polvo de mármol utilizado como reemplazo del 10% de arena, obtuvo mayor resistencia que la mezcla con reemplazo de polvo de mármol por cemento.

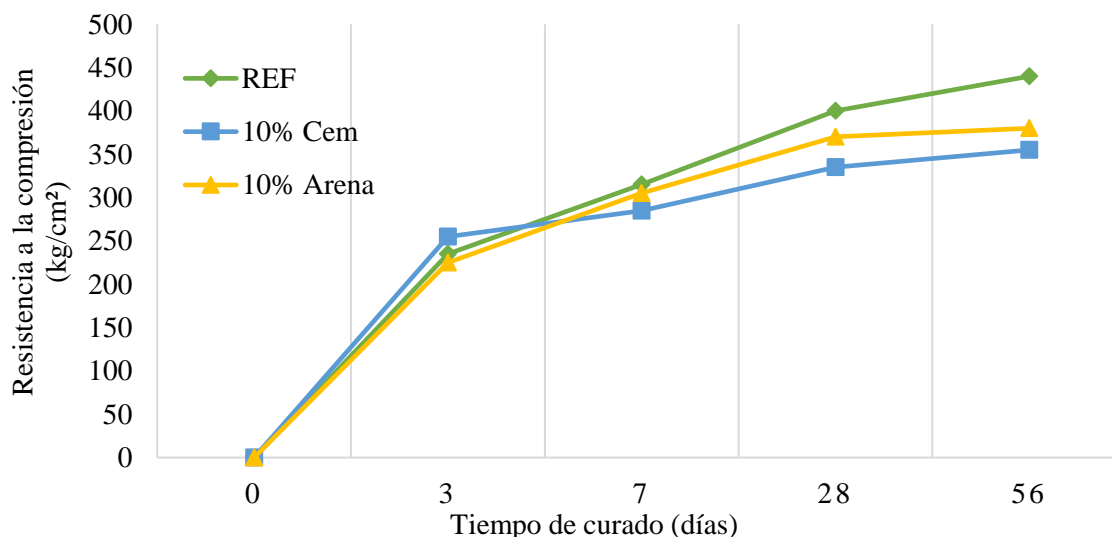


Figura 2. Resistencia a la compresión frente a tiempo de curado para morteros con sustitución parcial de polvo de mármol por cemento y arena. (Corinaldesi, et al., 2010)

Li G. L. *et al* (2019), proponen la sustitución con polvo de mármol en dos opciones para el mortero base cemento. La primera propuesta es la sustitución parcial del cemento en la mezcla, sin alterar la relación agua-cemento (a/c), y una segunda en la que se reemplaza una parte del cemento y del

agua necesaria para la fabricación del mortero, cambiando la relación a/c.

En primer lugar, para cada mezcla de mortero, el volumen de pasta (volumen de agua, cemento, expresado como porcentaje de volumen del mortero) más el volumen del polvo de mármol (expresado como porcentaje de volumen de mortero) fue fijado en 60%.

El polvo de mármol se ajustó a 0, 5, 10, 15 y 20 % y el volumen de pasta respectivo se fijó en 60, 55, 50, 45 y 40%, para sumar cada una de las mezclas el 60 % fijado con anterioridad. El volumen del agregado fino se fijó en el 40% del volumen total del mortero (Figura 3). Para la segunda propuesta el polvo de mármol reemplazó en 0, 5, 10, 15 y 20% del volumen del cemento, que fue fijado al 100, 95, 90, 85 y 80%.

Es importante recalcar que el volumen del agua de la mezcla se mantiene constante. (Figura 4). Con cada una de las mezclas se fabricaron 3 cubos de 100 mm por lado, después de 28 días de curado se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión.

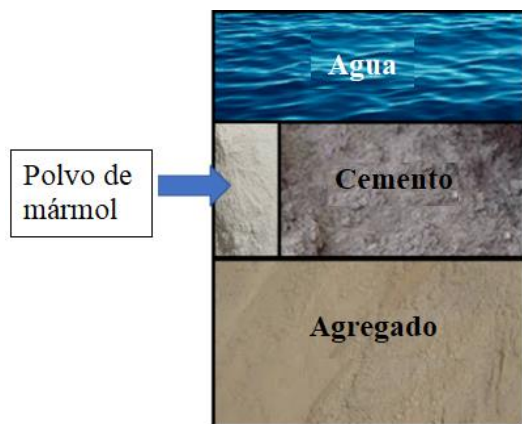


Figura 3. Método de reemplazo de cemento (Li, et al., 2019)

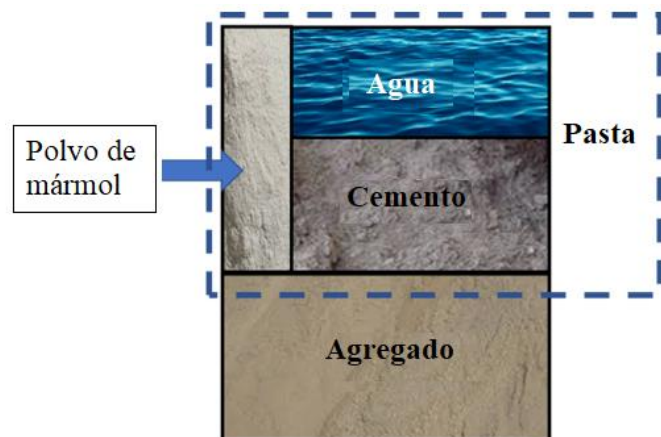


Figura 4. Método de reemplazo de pasta (Li, et al., 2019)

Las pruebas mostraron que en el mortero con reemplazo de pasta (cemento y agua) con una relación a/c de 0.40 y aumentando el volumen del polvo de mármol de 0% a 20%, incrementó la resistencia del cubo de 607.75 a 730.12 kg/cm², en la relación a/c de 0.55 aumentó la resistencia a la compresión de 402.79 a 543.51 kg/cm².

En las mezclas de mortero donde solo se sustituyó parcialmente el cemento con polvo de mármol de 0 a 5% y con una relación a/c de 0.40, la fuerza del cubo aumentó de 607.75 a 610.81 kg/cm², y aumentando el volumen de polvo de mármol de 0% a 20% se presentó una disminución de resistencia a la compresión de 607.5 a 488.44 kg/cm².

En el mismo caso, pero con una relación a/c de 0.55, y sustituyendo del 0 al 10% del cemento por polvo de mármol, la resistencia aumentó de 402.79 a 411.97 kg/cm², y con el remplazo de 0% a 20% la resistencia del cubo disminuyó de 402.79 a 344.66 kg/cm².

En el trabajo realizado por Yamanel y col. (2019) realizaron morteros reemplazando el 0, 5, 10, 15 y 20 % de cemento por polvo de mármol, y fabricaron prismas de 40 x 40 x 160 mm, curados durante 28 días, antes de realizar las pruebas mecánicas y de durabilidad de las muestras (Tabla 2).

Tabla 2. Proporciones de la mezcla de morteros. (Yamanel, et al., 2019)

Muestra	Cemento g	Polvo de mármol g	Arena g	Agua g
M-0	450.0	0.0	1350.00	225
M-5	427.5	22.5	1350.00	225
M-10	405.0	45.0	1350.00	225
M-15	382.5	67.5	1350.00	225
M-20	360.0	90.0	1350.00	225

A los 28 días de curado la resistencia a compresión de las mezclas afectadas al 5, 10, 15 y 20% es menor respecto a la de la mezcla sin sustitución de cemento.

A los 90 días de curado la mezcla con un reemplazo del 5% de polvo de mármol al cemento incrementó la resistencia a la compresión, inclusive mayor que la mezcla sin polvo de mármol (Figura 5).

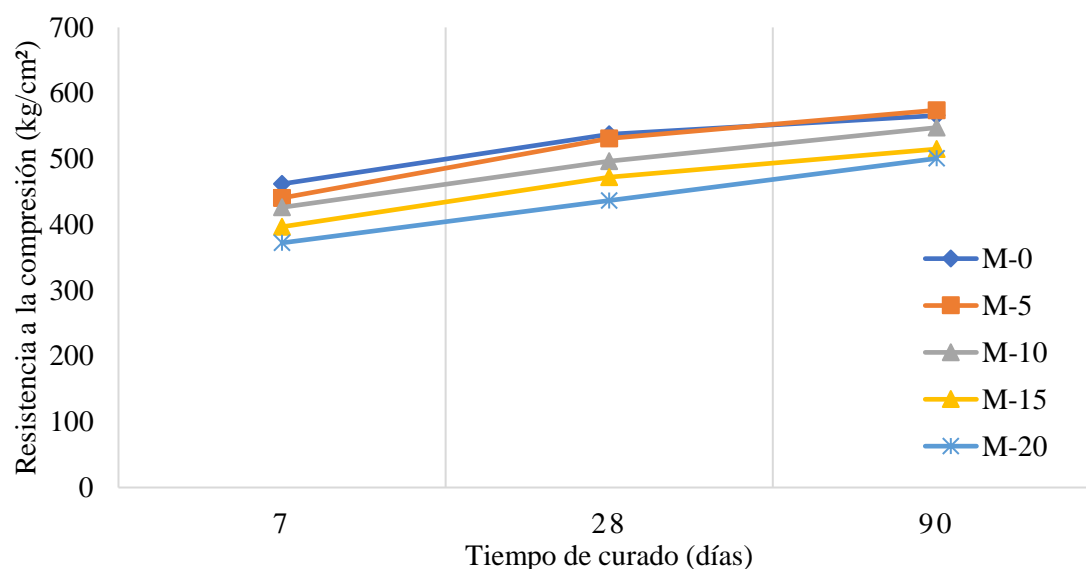


Figura 5. Resistencia a la compresión de los morteros (Yamanel, et al., 2019)

Toubal Seghir, N., et al. (2019), fabricaron morteros con proporciones 3:1 arena-cemento, y reemplazaron en niveles de 0%, 5%, 10% y 15% del peso de cemento en el mortero, por polvo de mármol. Se mantuvo una relación agua/cemento de 0.5 (constante). Las pruebas de resistencia a la compresión se hicieron con cubos de 50 mm de los morteros fabricados, y se ensayaron a 3, 7, 28 y 65 días. Las muestras fueron curadas al aire libre, este estudio ofreció los siguientes resultados: Todas las muestras hasta el 15% de sustitución obtuvieron una resistencia a la compresión menor que la muestra sin polvo de mármol, se atribuye esta disminución a la falta de curado, lo que provocó vacíos y grietas dentro de las muestras, así como una reducción de densidad de las muestras.

Corinaldesi, Moriconi y Naik (2010), muestran que el sustituir cemento por polvo de mármol, afecta la resistencia a la compresión y cuando se sustituye polvo de mármol por arena no se ve afectada. Li G. L. *et al* (2019), muestran que el incremento en la sustitución de polvo de mármol por cemento disminuye la resistencia a compresión y cuando la sustitución es menor la resistencia se mantiene o aumenta. Toubal Seghir, N., et al. (2019) muestra que para tener buenos resultados en la resistencia a compresión es necesario tener un buen curado de los especímenes.

Cuando se sustituye el polvo de mármol por cemento en morteros, en la mayoría de los casos se presenta una disminución en la resistencia a la compresión, sobre todo en relaciones agua/cemento menores a 0.5. Cuando la relación agua/cemento aumenta, la resistencia a compresión de las muestras también aumenta. Otro factor importante en la resistencia de las muestras es el curado, se menciona que cuando las muestras no se curan la resistencia a edades tempranas es baja.

2.3 Concreto con polvo de mármol.

2.3.1 Polvo de mármol como sustituto parcial del agregado fino del concreto.

También se ha buscado la aplicación del polvo de mármol en concretos, ya sea como sustituto parcial del cemento o como agregado fino, sin menoscabar la resistencia a la compresión.

En 2010, Santos, Villegas y Betancourt proponen la sustitución parcial del agregado fino del concreto y usar polvo de mármol.

La propuesta que realizaron fue el reemplazo parcial de arena por polvo de mármol en rangos de 10 en 10, de 0-80 %, manteniéndose fijos la relación a/c, el peso del cemento y del agregado grueso, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosificaciones de concreto (Santos, et al., 2012)

Material		Control	M10	M20	M30	M40	M50	M60	M70	M80
Arena	kg/m ³	793	714	634	555	476	397	317	238	159
Polvo de mármol	kg/m ³	0	79	159	238	317	397	476	555	634
Grava	kg/m ³	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044
Agua	kg/m ³	228	325	325	325	325	325	325	325	325
Cemento	kg/m ³	325	325	325	325	325	325	325	325	325
a/c	kg/m ³	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

De las pruebas de resistencia a la compresión aplicadas a las dosificaciones anteriores a los 7 y 28 días de curado se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Figura 6.

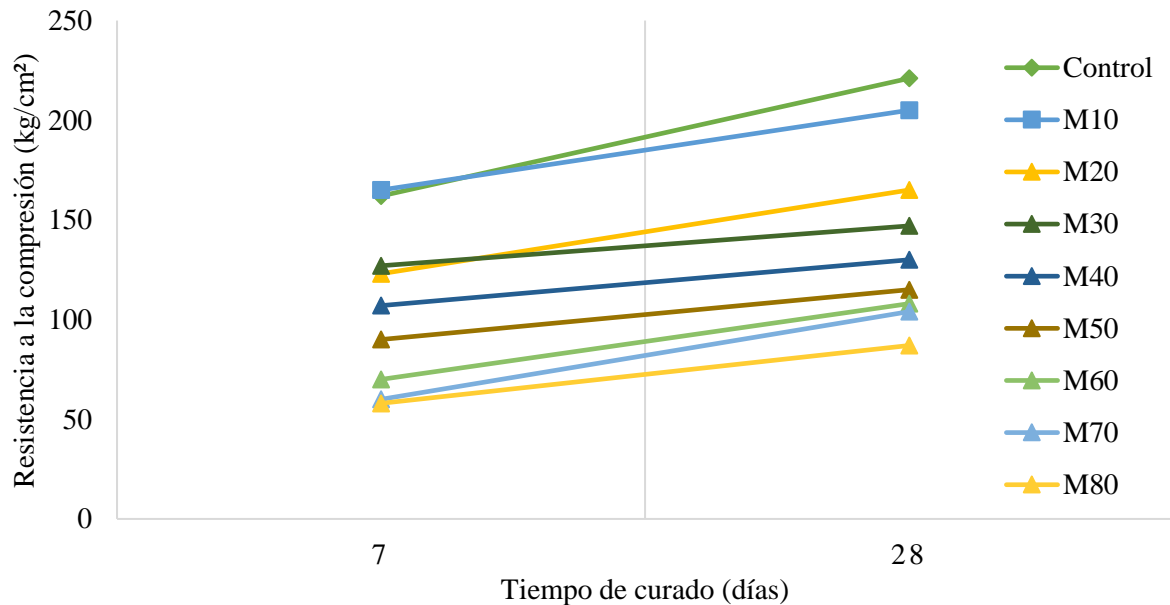


Figura 6. Resultados de resistencia a la compresión de los concretos con polvo de mármol. (Santos, et al., 2012)

Se puede constatar que a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de arena por polvo

de mármol, la resistencia a compresión disminuye. Dicha pérdida de resistencia es similar al porcentaje de polvo de mármol, es decir, la dosificación M40 tiene un 40% menos de resistencia a la compresión en comparación con el control (Santos, et al., 2012).

Hebnoub, H., et al. (2011) sustituyeron parcialmente en proporciones del 25%, 50%, 75% y 100% polvo de mármol por el agregado fino; fabricaron cilindros de concreto y fueron curados y probados según las normas de la Unión Europea (EU). Las muestras fueron ensayadas a edades de 2, 14, 28 y 90 días de curado, para determinar su resistencia a la compresión. Los resultados encontrados por los autores reflejaron que la resistencia a la compresión en las tasas de sustitución del 25, 50 y 75 % ofrecieron una mayor resistencia que la muestra testigo; la sustitución del 100% a edades de 14 y 28 días presentó una menor resistencia que la muestra sin polvo de mármol, pero a la edad de 90 días, la resistencia prácticamente se equiparó con la muestra original.

Rahangdale, S. & Qureshi, S. (2018) realizaron un estudio comparando las propiedades de un concreto tradicional con uno fabricado con materiales complementarios (ceniza volante para el cemento; piedra y polvo de mármol en sustitución parcial de agregado fino).

Se fabricaron 14 muestras, en las primeras 3 muestras (1, 2 y 3) se sustituyó el 35% de cemento por ceniza volante y el agregado fino fue reemplazado en un 30% por piedra y polvo de mármol, en cantidades de 20% - 10%, 15% - 15% y 10% - 20% respectivamente; las resistencias a la compresión fueron menores a las registradas por la muestra de concreto control (35.58 N/mm²), variando a 28 días las resistencias de 28.05, 28.87 y 30.35 N/mm².

En las muestras 4, 5 y 6 se mantuvo la cantidad de ceniza volante, pero las cantidades de piedra y polvo de mármol se aumentaron al 40% de la siguiente manera: 30-10%, 20-20%, 10-30%, obteniéndose las siguientes resistencias a 28 días: 27.25, 25.65 y 26.65 N/mm². De estos resultados se puede observar que se mantiene el decremento mostrado en la resistencia a la compresión de las series 1, 2 y 3.

En las muestras 7, 8, y 9, se disminuyó la ceniza volante a un 25%, y se vuelve al 30% de sustitución en agregados finos en la misma cantidad que el de las muestras 1, 2 y 3; las resistencias registradas fueron de 29.75, 32.04 y 35.45 N/mm², siendo estas mayores a las anteriores, pero aún se mantiene por debajo de la muestra original.

En las siguientes 3 muestras (10, 11 y 12) se mantiene la ceniza volante al 25% y el porcentaje de sustitución del agregado fino cambia al 40% como en las muestras 4, 5 y 6, los resultados obtenidos fueron de 30.29, 31.54 y 29.87 N/mm², y una vez más se observa que las resistencias a la compresión disminuyen.

En la muestra 13 la ceniza volante se consideró en un porcentaje de 22.5%, y en el agregado fino del 30% (10% piedra de mármol y 20% polvo de mármol). A los 28 días la resistencia a la compresión registrada fue de 35.49 N/mm², que es la mayor de las muestras analizadas, prácticamente igualando a la resistencia a la compresión de la muestra control.

En la última muestra (14) la ceniza volante sustituyó en un 20% al cemento, y en el agregado fino del 30% (10% piedra de mármol y 20% polvo de mármol) a los 28 días la resistencia registrada fue de 38.87 N/mm², incrementándose la resistencia a la compresión en un 0.75%, siendo prácticamente la misma resistencia que la muestra de referencia.

De esta manera, con las dosificaciones de la muestra 14 se minimiza el uso de cemento, por lo tanto, los autores recomiendan utilizar materiales suplementarios para resolver problemas ambientales y avanzar a la sostenibilidad del desarrollo de la industria de la construcción.

Verma, M., Kaushal, N. & Sharma, A. (2019) sustituyeron en la fabricación de concreto el agregado fino en proporciones de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% por polvo de mármol, y realizaron pruebas a compresión a los 7 y 28 días de edad. Los resultados obtenidos en la muestra sin modificación fueron de 19.10 y 24.73 N/mm² a 7 y 28 días respectivamente.

En la muestra del 5% se observa un incremento de 20.36 y 27.40 N/mm² en 7 y 28 días respectivamente, de igual manera en la muestra de 10% se volvió a presentar incremento de

resistencia de 20.51 y 29.92 N/mm² en 7 y 28 días respectivamente.

A partir de las muestras con 15% al 30% las resistencias a la compresión presentaron disminución respecto a la muestra original con disminuciones a 7 días de 15.85 a 12.14 N/mm² y en 28 días de 24.44 a 18.07 N/mm², por lo que se determina que una sustitución parcial del agregado fino hasta por un 10% de polvo de mármol genera una mayor resistencia a la compresión.

En Giza, Egipto, Mostafa Shaaban (2020) realizó un estudio donde sustituye en concreto lanzado, porcentajes del 5, 10, 15, 20, 25 y hasta el 30% parcialmente de arena con polvo de mármol. A los siete días de edad las muestras ensayadas a resistencia a la compresión con la sustitución parcial del 5% obtuvieron un valor menor a la muestra sin polvo de mármol.

Las muestras a partir del 10% presentaron aumento en la resistencia a la compresión, a los 28 días de edad (del 5% hasta el 30%), esto debido a la finura del polvo de mármol que realiza un efecto de relleno en el concreto. También se determina que la adhesión del concreto lanzado aumenta proporcionalmente a mayor sustitución de polvo de mármol por arena.

Ince, C., et al. (2020) utilizaron polvo de mármol en concreto puzolánico; el concreto fue preparado con un 20% de humo de sílice sustituyendo cemento y el polvo de mármol en proporciones de sustitución del agregado fino del 10% y 20%, se fabricaron cilindros de 15 cm de diámetro con una altura de 30 cm. El estudio tuvo una duración de 1 año y todas las muestras fueron curados bajo agua. Los resultados de resistencia a la compresión muestran que la sustitución del 20% de humo de sílice aumentó la resistencia a la compresión a largo plazo, se atribuye este aumento de resistencia a la actividad puzolánica del humo de sílice. En cuanto a la sustitución del polvo de mármol en el agregado fino, la sustitución de 20% presenta un ligero decremento en la resistencia a la compresión que la mostrada por la sustitución del 10%, comparada con la muestra control sin sustitución. Tanto las muestras de 10% como las de 20% presentan aumento en la resistencia a la compresión.

Santos, Villegas y Betancourt (2010) y Rahangdale, S. & Qureshi, S. (2018) encontraron que a mayor cantidad de polvo de mármol menor resistencia a la compresión. Hebnoub, H., et al. (2011) y Verma, M., Kaushal, N. & Sharma, A. (2019) muestran que se puede sustituir polvo de mármol en mayor cantidad sin verse afectada la resistencia. Ince, C., et al. (2020) muestran en los resultados que la sustitución de polvo de mármol hasta de 20% en concreto puzolánico se puede tener un incremento en la resistencia a compresión.

De acuerdo con los autores de este apartado, se menciona que sustituir polvo de mármol por agregado fino hasta un 10% no afecta en la resistencia a la compresión, ya que no aumenta ni disminuye cuando se incrementa la sustitución de polvo de mármol por agregado fino en el concreto. Si la resistencia disminuyese considerablemente, podría atribuirse a que el polvo de mármol hasta un 10 % ayuda a cubrir poros que el agregado fino no puede hacer, y cuando es mayor al 10% le falta agregado que ayude a dar fuerza al concreto.

2.3.2 Polvo de mármol como sustituto parcial del cemento en el concreto.

También se han realizado pruebas a concretos de alto rendimiento, en un estudio realizado por Talah, Kharchi y Chaid (2015), elaboraron dos mezclas de estudio, la primera como concreto de referencia (RC) y una segunda mezcla de concreto de alto rendimiento con polvo de mármol (HPCMP) al cual se le sustituyó un 15% de cemento por polvo de mármol. Las dosificaciones usadas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Proporciones de mezclas y propiedades del concreto. (Talah, et al., 2015)

Mezcla	Relación a/c	Cemento kg/m ³	Polvo de mármol kg/m ³	Agua kg/m ³	Arena kg/m ³	Grava 3/8 kg/m ³	Grava 8/16 kg/m ³
RC	0.5	400	0	200	788	163	886
HPCMP	0.5	340	60	200	788	163	886

Se evaluaron las resistencias a la compresión de cada mezcla sobre cilindros de 160 x 320 mm, a los 7, 28, 90, 180 y 365 días de edad. Todas las muestras se compactaron mediante una mesa vibratoria, después del desmolde las muestras fueron divididas en dos grupos iguales y curadas en las siguientes condiciones: en la primera condición de curado las muestras se sumergieron en agua hasta la edad de la prueba, mientras que, en la segunda condición de curado, se sumergieron en agua agresiva (5% CaCl₂) hasta la edad de prueba.

En la Figura 7 se muestrans los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas, según la condición de curado y la edad del concreto.

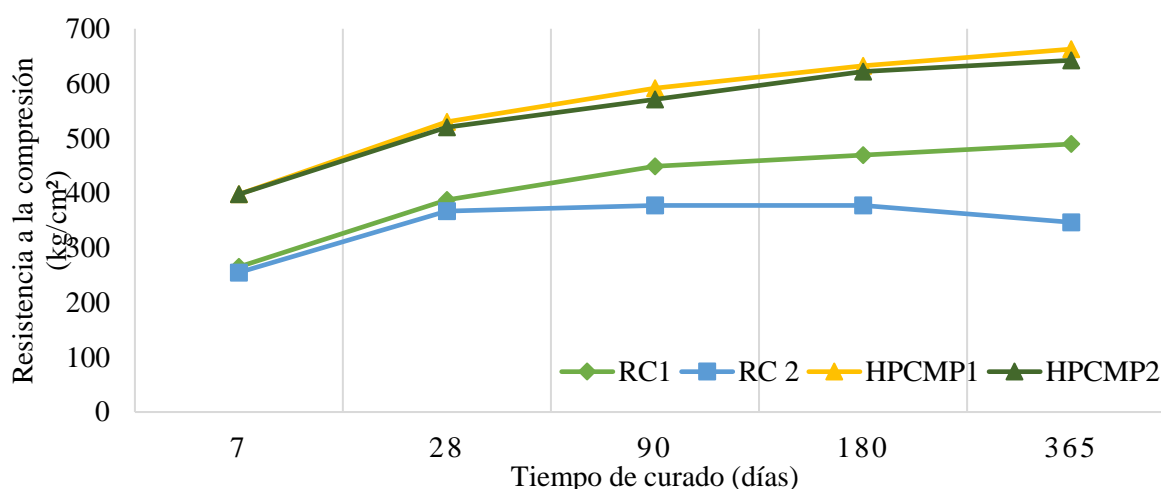


Figura 7. Evolución de la resistencia a la compresión a diferentes edades (Talah, et al., 2015)

El resultado indica que hubo una ganancia sistemática en la resistencia a la compresión con el contenido de polvo de mármol. Se observó que la relación entre la resistencia a la compresión de las probetas sometidas a curado por agua y las curadas bajo condiciones agresivas el concreto de referencia se desvió hasta un 29%. Sin embargo, esta relación para los concretos que contienen polvo de mármol se encuentra dentro de un rango del 3%, dependiendo principalmente del contenido de polvo de mármol y la edad de prueba. Esto implica que los concretos de referencia son más sensibles a medios agresivos que el concreto con polvo de mármol. (Talah, et al., 2015). En 2017 Singh, Srivastava y Bhunia, realizan pruebas a concretos sustituyendo en 0, 10, 15, 20 y 25% del cemento por polvo de mármol, además se experimenta con 3 relaciones a/c 0.35, 0.4 y 0.45. La dosificación de los concretos se muestra en la Tabla 5.

Ghorbani, S., et al. (2018) sustituyeron proporcionalmente el cemento Portland tipo II, por 0%, 5%, 10% y 20%, de polvo de mármol, polvo de granito o la combinación de ambos. Las muestras se sometieron a curado y fueron analizadas a 7 y 28 días de edad. En las muestras de polvo de mármol y polvo de granito como sustituto parcial de cemento, no se afectó significativamente la resistencia a la compresión, tanto en 7 días, como en 28 días. En las muestras donde solo se sustituyó con polvo de mármol, las muestras de 5 a 15% de sustitución presentaron una mejora a la resistencia a la compresión, no así la sustitución del 20% que presentó una disminución de

resistencia a la compresión de 0.94 y 0.96 veces tanto en las mezclas de polvo de mármol como en las de polvo de granito; en las muestras donde se sustituyó con polvo de granito por cemento, la muestra del 10% ofreció una resistencia mayor entre los rangos de 1.14 y 1.09 veces de la muestra sin sustitución alguna. Los autores determinaron que el aumento en la resistencia a la compresión presentada en este estudio se debe a la mejora de la densidad de las muestras por el relleno de los poros de estas. Por último, según aumenta la edad del curado, disminuye la pérdida de resistencia a la compresión.

Mostafa Shaaban (2020) sustituyó parcialmente cemento por polvo de mármol en la mezcla para la fabricación de concreto lanzado, en proporciones del 5, 10, 15, 20, 25, hasta 30%. Los resultados obtenidos reportaron que el uso del polvo de mármol en cualquiera de las proporciones de sustitución presentaron un decremento en la resistencia a la compresión; en las muestras de 5% de sustitución a edades tempranas (7 días) presentaron una disminución en la resistencia a la compresión del 5.4% con relación a la muestra original, y a los 28 días, una disminución que llegó al 23.4% en las muestras con el 30% de sustitución de polvo de mármol.

Babouri, L., et al. (2020) usaron polvo de mármol como sustituto parcial de cemento portland ordinario en la fabricación de concreto; los porcentajes de sustitución usados fueron del 5%, 10%, 15%, y 20%, y realizaron pruebas de resistencia a la compresión a 2, 7, 14 y 28 días curado.

Las muestras con 5%, 10% y 15% presentaron resultados de resistencia a la compresión menor a la muestra original sin polvo de mármol, pero la muestra con el 5% de polvo de mármol, desde el día 2 hasta el 28 de la última prueba mostraron un aumento de resistencia, se atribuye este aumento de resistencia a la compresión a que el polvo de mármol reduce la porosidad, lo que se refleja en una muestra con menos vacíos, y, por lo tanto, más resistente.

Tabla 5. Proporciones de mezcla de concreto (Singh, Srivastava y Bhunia, 2017)

Relación a/c	Mezcla	Cemento kg/m ³	Polvo de mármol %	Polvo de mármol kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Agua kg/m ³
0.35	Control	422	0	0	1278	689	148
	M10	379.8	10	42.2	1278	689	148
	M15	358.7	15	63.3	1278	689	148
	M20	337.6	20	84.4	1278	689	148
	M25	316.5	25	105.5	1278	689	148
0.40	Control	394	0	0	1257.2	707.2	158
	M10	354.6	10	39.4	1257.2	707.2	158
	M15	334.9	15	59.1	1257.2	707.2	158
	M20	315.2	20	78.8	1257.2	707.2	158
	M25	295.5	25	98.5	1257.2	707.2	158
0.45	Control	351	0	0	1183	858	158
	M10	315.9	10	35.1	1183	858	158
	M15	298.35	15	52.65	1183	858	158
	M20	280.8	20	70.2	1183	858	158
	M25	263.25	25	87.75	1183	858	158

Los resultados de las pruebas de la resistencia a la compresión muestran un aumento de resistencia en las mezclas con reemplazo del 10% y del 15% con polvo de mármol. Este aumento puede atribuirse a que el polvo de mármol ayuda a formar mezclas más densas y sin tanta porosidad. Las mezclas con porcentajes de sustitución del 20 y 25% presentan una disminución en la resistencia a

la compresión, que posiblemente se deba a la falta de material cementante en el concreto.

Las muestras con relación a/c de 0.35 presentaron un aumento de resistencia en la muestra con 15% de sustitución (Figura 8). De igual manera, en el mismo porcentaje de reemplazo, pero en la relación a/c de 0.40, también se presenta un incremento en la resistencia a la compresión (Figura 9).

Para la relación a/c de 0.45 la resistencia a la compresión disminuyó, en comparación con las relaciones a/c de 0.35 y 0.40 (Figura 10).

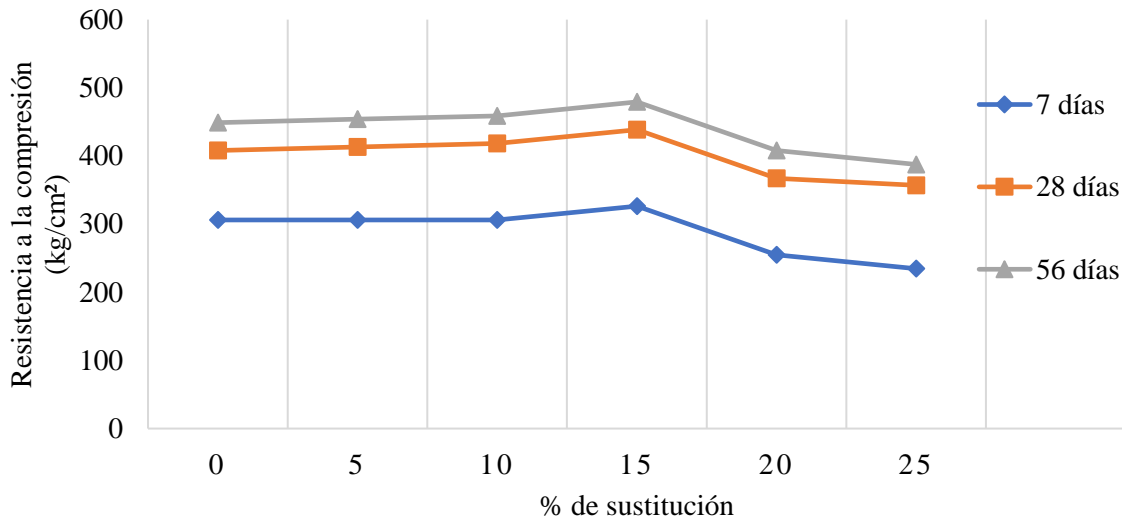


Figura 8. Resistencia a la compresión de muestras de concreto con relación a/c 0.35.

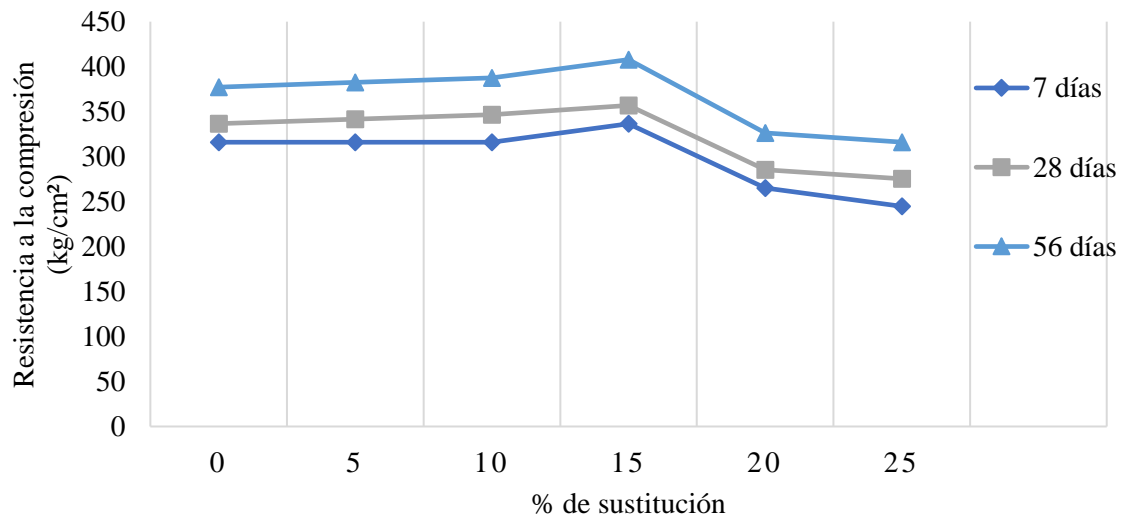


Figura 9. Resistencia a la compresión de muestras de concreto con relación a/c 0.40.

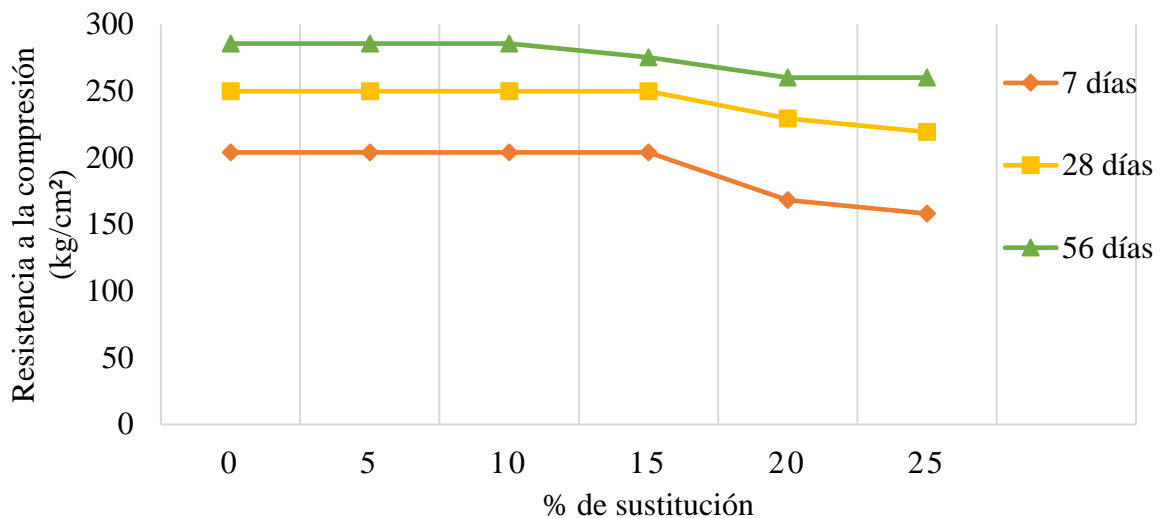


Figura 10. Resistencia a la compresión de muestras de concreto con relación a/c 0.45

En otra investigación se experimentó con reemplazo de cemento por residuos de mármol en 0, 5, 10 y 20%, y se determinó que el uso de polvo de mármol en concreto en el rango de 10-15% aumenta la resistencia a la compresión. (Khodabakhshian, et al., 2018).

Wang, Y., et al. (2022) fabricaron concreto reemplazando cemento por polvo de mármol en proporciones de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%, en muestras de cubos de 150 mm, realizando pruebas de resistencia a la compresión a 3, 7, 14 y 28 días de edad, obteniendo los siguientes resultados: la muestra control presentó resistencias de 23.8, 29.8, 33.1 y 35.0 MPa en 3, 7, 14 y 28 días respectivamente, las muestras de 5% a los 3 días obtuvo una resistencia a la compresión menor que la muestra original, la muestra con 10% de polvo de mármol de los 3 a los 14 días, de igual manera que la de 5%, tuvo una resistencia menor, pero a los 28 días ésta fue de 35.4 MPa, incrementándose en un 1.14% respecto a la muestra original. Las demás sustituciones (15%, 20% y 25%) mostraron hasta en un 21.14% (28 días) menor resistencia a la compresión que la muestra sin polvo de mármol.

Talah, Kharchi y Chaid (2015) encontraron que se puede sustituir polvo de mármol por cemento y tener una ganancia en resistencia a compresión si se tiene un vibrado para sacar el aire en la fabricación de las muestras. Ghorbani, S., et al. (2018), Mostafa Shaaban (2020), Babouri, L., et al. (2020), (Khodabakhshian, et al., 2018), y Wang, Y., et al. (2022), encontraron que el rango de sustitución de polvo de mármol por cemento, para que no se vea afectada la resistencia a compresión, es de 0 a 10 %.

De este apartado se puede concluir que se puede sustituir hasta un 10% de polvo de mármol por cemento para que la resistencia a compresión en el concreto no se vea afectada. Según los resultados de los ensayos, la resistencia a compresión se afecta cuando la sustitución de polvo de mármol es mayor al 10%.

2.4 Polvo de mármol, concreto, mortero y superplastificantes.

Los aditivos reductores de agua (plastificantes) y reductores de agua de alto rango (superplastificantes), contribuyen a aumentar la durabilidad y proporcionan una reducción de la cantidad de agua de por lo menos el 5%, disminuyendo la relación a/c, y los superplastificantes, por lo menos 12% y hasta 40%.

Corinaldesi, Moriconi y Naik (2010) en una muestra de referencia, sustituyeron el 10% de cemento por polvo de mármol y en una segunda opción sustituyeron el 10% de arena; además se agregó un aditivo superplastificante de base acrílica en una proporción del 0.5% del peso del cemento, como se muestra en la Tabla 6.

Se fabricaron 3 cubos obtenidos de barras de 40 x 40 x 160 mm de cada mezcla, para realizar pruebas de compresión a 3, 7, 28 y 56 días de curado.

Tabla 6. Proporciones de mortero con superplastificante.

Mezcla	Ref	10% Cemento	10% Arena
A/C	0.48	0.49	0.53
Agua (kg/m ³)	220	200	240
Cemento (kg/m ³)	450	405	450
Arena (kg/m ³)	1350	1350	1215
Polvo de mármol (kg/m ³)	0	45	135
Aditivo superplastificante (kg/m ³)	2.25	2.02	2.25

Las dos muestras reportaron mayor resistencia a compresión en edades tempranas. A los 28 días de edad la muestra de referencia obtuvo mayor resistencia, sin embargo, el uso del plastificante proporcionó incremento en la resistencia a la compresión comparado con el estudio realizado sin aditivo. (Figuras 2 y 11).

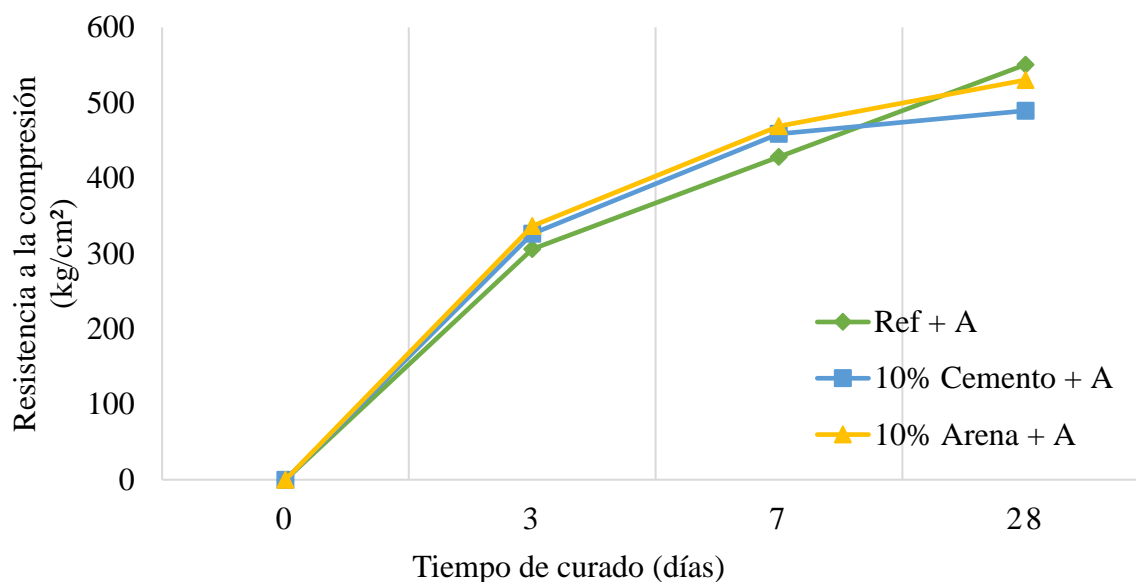


Figura 11. Resistencia a la compresión con relación al tiempo de curado en morteros con aditivo superplastificante.

En síntesis, cuando se usa algún superplastificante en el concreto se logra un incremento en la resistencia a compresión. Se puede decir que se puede sustituir el polvo de mármol por cemento en una cantidad mayor al 10% y para compensar la resistencia se aplica un superplastificante.

2.5 Estudios experimentales previos para elaborar ladrillos con polvo de mármol.

Santos, Villegas, y Betancourt (2012) realizaron un estudio proponiendo una serie de dosificaciones teniendo como base el polvo de mármol, la cantidad de cemento en las muestras varió, y la cantidad de agua no cambió (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de ladrillos a base de polvo de mármol. (Santos, et al., 2012)

Muestra No.	Cemento %	Agua (c+RM) %	Resistencia (kg/cm ²)	Absorción %
1	8	15	45.83	17
2	11	15	81.56	16
3	14	15	82.76	18

Se fabricaron cilindros de 15 cm de altura y 7.5 cm de diámetro, también cubos de 5 cm. Concluyeron que la forma de los ladrillos no afectó a los resultados.

Los resultados muestran que hay una influencia importante en la resistencia con el incremento de 8 a 11% de cemento, pero a un porcentaje mayor de 11% no hay incremento en la resistencia.

Los resultados muestran que la absorción no cambió en función de la cantidad de cemento.

Morales-Olán, y colaboradores (2015) proponen la fabricación de un bloque de 14 x 20 x 40 cm de sección, elaborado con polvo de mármol, tepezil, cemento y agua. La dosificación se muestra en la Tabla 8. Las mezclas se compactaron mediante vibración y prensado, y tuvieron proceso de secado al sol por 48 horas.

Tabla 8. Composición en porcentaje de materiales en las mezclas evaluadas. (Morales-Olán, et al., 2015)

Material	M1 %	M2 %
Residuo de Mármol	55	35
Tepezil	31	51
Cemento	6	6
Agua	8	8

Los resultados que obtuvieron en la prueba de la absorción de agua muestran que; la muestra 1 absorbe menor cantidad de agua que la muestra 2, en cuanto a las pruebas de resistencia a la compresión, reportan un mejor comportamiento en la muestra 1 sobre la muestra 2, como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de absorción de agua y resistencia a la compresión de las muestras. (Morales-Olán, et al., 2015)

Muestra No.	Absorción agua %	Resistencia (kg/cm ²)
1	19.43 ± 5.55	38.40 ± 1.84
2	23.91 ± 0.25	21.46 ± 3.25

Con los resultados presentados, la muestra 1 cumple con las características necesarias indicadas en las NMX-C-441-ONNCCE-2013 para trabajar como material de construcción de uso no estructural.

Otro estudio realizado para elaborar ladrillos con polvo de mármol fue realizado por Nevárez y Rangel (2014). En la Tabla 10 se indica la dosificación empleada para la elaboración de los ladrillos de referencia, curados de manera tradicional y saturados en agua. Las Tablas 11 y 12 reportan los resultados de las pruebas a compresión de ladrillos, con dos opciones de cantidad de cemento, 12 y 15%.

A todas las muestras, durante el proceso de llenado de los moldes, se les aplicó una precarga de 100 kg/cm² durante un minuto, pero, el autor no explica el proceso de precarga en su documento.

Tabla 10. Dosificaciones que aprobaron el ensaye de resistencia a la compresión.
(Nevarez & Rangel, 2014)

Componente	Mezcla a 12% de cemento	Mezcla a 15 % de cemento
Polvo de mármol	10 kg	10 kg
Cemento	1.2 kg	1.5 kg
Arena	2 kg	2 kg
Agua	2 l	2 l

Tabla 11. Resultado resistencia a la compresión de muestras de ladrillos a 7, 14 o 28 días de curado 15% cemento (Nevarez & Rangel, 2014)

Muestra No.	7 días de curado (kg/cm ²)	14 días de curado (kg/cm ²)	28 días de curado (kg/cm ²)
1	122.70	89.12	89.99
2	138.50	Testigo	Testigo
3	140.70	119.29	Testigo
4	136.60	86.05	87.47
5	144.30	Testigo	88.00
6	129.90	86.46	88.96
7	109.70	88.00	87.88
8	149.90	86.79	88.57
9	130.9	86.61	86.20
10	100.4	87.79	86.16

Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión con 12% de cemento.
(Nevarez & Rangel, 2014)

No. Días	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
7 días	107.00
14 días	107.15
28 días	95.55

Para el caso de 12% de cemento en las muestras se concluye que la mayor resistencia a la compresión se presenta a edades tempranas, es decir, a la edad de 7 días, mientras que para la edad de 14 y 28 días la resistencia disminuye en comparación a los 7 días, pero se mantiene la magnitud entre los 14 y 28 días. Para el caso de 15% de cemento la resistencia a compresión disminuye en comparación con las muestras de 12% en la edad de 7 días, pero en las edades de 14 y 28 días aumenta, lo que indica que para la cantidad de cemento en porcentajes pequeños la resistencia aumenta a edad temprana y los porcentajes más altos aumentan la resistencia a edades avanzadas. Betancourt *et al* (2015) elaboraron un ladrillo con Cemento Portland Compuesto tipo I, agua potable, arena de río y polvo de mármol, con el fin de observar el comportamiento de diferentes proporciones y formas de las muestras, cubos de 5 x 5 x 5 cm, cilindros de 7.5 de diámetro y 15 cm de alto y pastillas de 5 x 10 cm; los resultados de las pruebas a compresión se presentan en las Tablas 13, 14 y 15 respectivamente.

Tabla 13. Resistencia a la compresión en cubos de 5 x 5 x 5 cm elaborados con base de polvo de mármol. (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Mezcla #	Cemento %	Cal %	Agua %	Resistencia a la compresión kg/cm ²
1	25	0	20	76.60
2	22.5	2.5	20	60.00
3	20	5	20	52

Tabla 14. Resistencia a la compresión, en elementos cilíndricos de 7.5 x 15 cm elaborados con base de polvo de mármol. (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Mezcla #	Cemento %	Cal %	Agua %	Resistencia a la compresión. kg/cm ²
1	25	0	20	67.90
2	22.5	2.5	20	56.24
3	20	5	20	48.00

Tabla 15. Resistencia a la compresión de pastillas de 5 x 10 cm con materia base de polvo de mármol y arena, prensadas a 70 kg/cm². (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Muestra	Cemento %	Arena %	Agua %	Resistencia a la compresión kg/cm ²
1	8	0	20	28
2	10	20	20	76
3	10	30	20	90

En las tablas 13, 14 y 15 se muestran los resultados de resistencia a compresión de cubos, cilindros y pastillas fabricadas con polvo de mármol en su mayor porcentaje. En las tablas se muestran los porcentajes de cemento, arena y agua únicamente y el porcentaje que falta para llegar al 100% en cada pieza es lo que corresponde al polvo de mármol

Los elementos con mayor cantidad de cemento mostraron mejores resultados a la compresión. La forma del elemento no influye significativamente en los resultados. Con respecto a los resultados de la Tabla 15, se observa que, al agregar arena y comprimir la muestra, aumenta la resistencia a la compresión (Betancourt Chávez, et al., 2015).

Para las dosificaciones anteriores se consideró que, del peso a usar del polvo de mármol, se utilizaron los porcentajes de cemento, cal, arena y agua según lo indicado en las tablas 13, 14 y 15.

Moreno *et al* (2020) fabricaron ladrillos con una mezcla a base de polvo de mármol, cemento, agua y arena de río (AR), realizaron 4 mezclas más, tomando como base la dosificación mostrada en la Tabla 16.

Tabla 16. Dosificación de ladrillo de mármol con arena de río (AR). (Moreno Juárez, et al., 2020)

Material	Cantidad
Polvo de Mármol	15 kg
Cemento	2.25 kg
Arena de Río	3 kg
Agua	7 l

En la primera mezcla se agrega arena de río, en la segunda mezcla se sustituyeron al 100% la arena de río por arena triturada caliza (AT), la tercera mezcla se sustituye al 100% la arena de río por arena sílica (S), la siguiente mezcla con un 66% de arena sílica y el resto del agregado con arena de río (SR), en la última mezcla con un 66% de arena de río y el resto con arena sílica (RS). Los resultados a compresión a 28 días de curado, según cada mezcla, se presentan en la Figura 12.

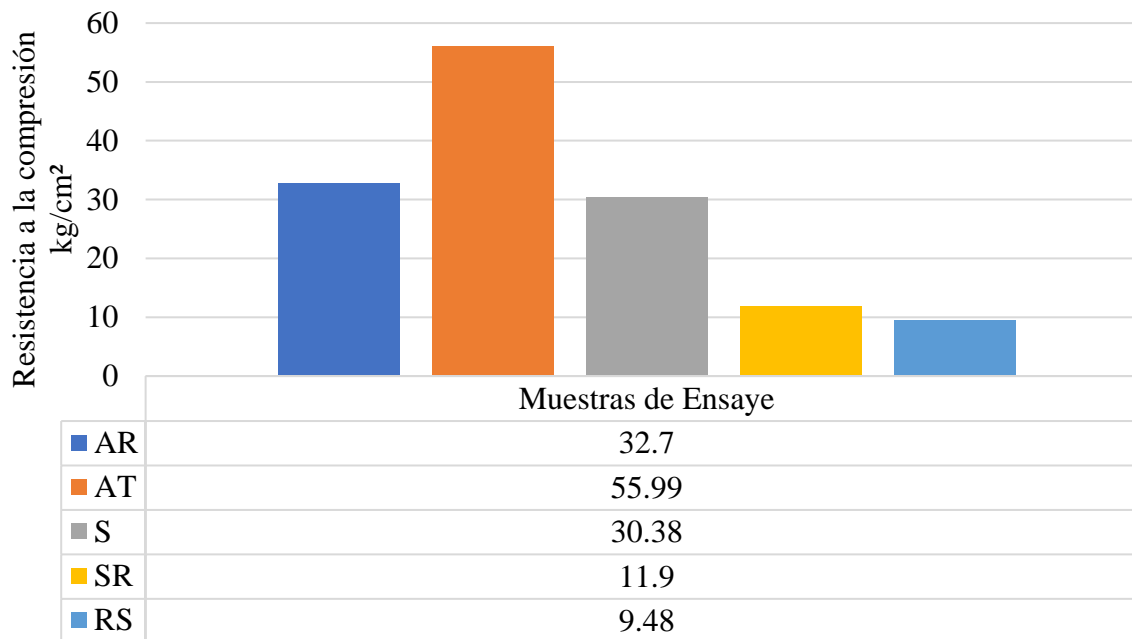


Figura 12. Resistencia a la compresión de muestras de ensaye. (Moreno Juárez, et al., 2020)

Con los resultados presentados, la mezcla AT tuvo mejor comportamiento a compresión (Figura 12), pero no cuenta con la suficiente resistencia para trabajar como ladrillo estructural según la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

En Pakistán, Khan, et al (2021) analizaron el comportamiento de ladrillo de arcilla con la sustitución parcial de polvo de mármol en porcentajes de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. En el estudio participaron 3 diferentes fábricas de ladrillos de la región; los resultados obtenidos fueron similares en cada una de las empresas participantes. Realizaron pruebas de eflorescencia, conductividad térmica, resistencia a la compresión, porosidad, absorción y densidad.

La densidad de los ladrillos en la muestra original sin polvo de mármol fue de 1.55 g/cm³, y disminuyó según aumentaba el porcentaje de sustitución hasta llegar al 30% con una densidad de 1.27 g/cm³. Las muestras no presentaron eflorescencia. La porosidad de las muestras también aumentó según el porcentaje de sustitución de polvo de mármol, de un 12.6% hasta un 52.71%, esto debido a la liberación de Dióxido de Carbono (CO₂), además el Óxido de Calcio (CaO), siendo expandible provoca porosidad en la muestra, por lo tanto, también se refleja un aumento en la absorción de las muestras de un 18% hasta un 36%. Dado el incremento de la porosidad en los ladrillos, también la resistencia a la compresión se ve afectada considerablemente, decreciendo la resistencia de compresión de 18.06 MPa hasta 4.83 MPa. Khan et al (2021) comentan que las normas Turcas y Europeas indican que un ladrillo de arcilla deberá tener una resistencia mínima de 7 MPa, por lo que una sustitución de hasta un 20% de polvo de mármol por arcilla cumple con la norma de resistencia a compresión para ladrillo. Debido al aumento de la porosidad de los ladrillos, la conductividad térmica disminuyó de 0.99 a 0.86 W/mK, y se concluye que con este resultado las piezas trabajarían como aislamiento térmico.

Santos, Villegas, Betancourt (2012) y Khan et al (2021) encontraron buenos resultados en la

resistencia a la compresión de los ladrillos a bajos contenidos de sustitución de polvo de mármol y a mayores porcentajes la resistencia disminuye, Morales-Olán, et al (2015) muestran resultados donde se combina polvo de mármol con Tepezil y se muestra que a mayor sustitución de polvo de mármol mayor resistencia. Nevárez y Rangel (2014) tienen en sus ladrillos resistencias a la compresión altas siempre y cuando se tenga una precarga en la fabricación de los ladrillos, Betancourt *et al* (2015) encontraron que la resistencia a la compresión de las muestras es proporcional a la cantidad de cemento, es decir, a mayor cemento mayor resistencia. Moreno *et al* (2020) en su investigación usaron diferentes tipos de arena resultando con el mejor comportamiento la arena caliza.

Como conclusión de este apartado se determina que los ladrillos de polvo de mármol pueden ser utilizados como elementos no estructurales y como aislamiento térmico.

3. CONCLUSIONES

Como conclusión de esta revisión se puede mencionar que el polvo de mármol puede ser usado en la construcción ya sea para sustituir cemento, para sustituir agregado fino o para fabricar ladrillos no estructurales. Es un tema con mucho potencial donde se pueden tener buenos resultados si se profundiza en la investigación.

Se demuestra que el polvo de mármol como sustituto parcial del cemento en proporciones no mayores del 10-15% se mantiene u ofrece un incremento de la resistencia a la compresión en morteros, concretos y la fabricación de ladrillos.

La adición de superplastificantes demostró un aumento de la resistencia de compresión en las mezclas de concreto convencional y la sustitución parcial de polvo de mármol al cemento no afecta la resistencia a compresión en esta condición.

El polvo de mármol como agente principal para la elaboración de ladrillos, complementados con arena y cemento, son factibles para uso no estructural en la construcción de mampostería en viviendas.

Por otro lado, la reducción de la cantidad de cemento usado en el concreto y morteros proyecta una reducción de costos, porque la diferencia del valor comercial respecto al polvo de mármol es mayor en el cemento. Esto implica que usar el polvo de mármol en la fabricación de ladrillos disminuye el costo de las piezas.

La energía requerida en la producción de cemento es alrededor de 1,18 GJ / ton. Por tanto, si se sustituye un 15% de sustitución de cemento por polvo de mármol reduce el consumo de energía en casi un 1.05%.

Con la reducción del contenido de cemento, la huella de carbono mostraría una reducción, por lo que su uso mostraría un impacto positivo al medio ambiente.

Para la fabricación de ladrillos se observa que, si se usa una compactación del material en el proceso de fabricación, se logra una mayor resistencia a la compresión, también se concluye que usar arena triturada en lugar de arena de río ayuda a la resistencia de las piezas.

En el caso del concreto se ha comprobado que es proporcional la pérdida de resistencia con el incremento de la sustitución de polvo de mármol. Se demostró que el porcentaje máximo de sustitución de polvo de mármol por cemento es del 10 % para que la resistencia no se vea afectada. Para la aplicación de polvo de mármol en morteros se concluye que es similar que en la aplicación de polvo de mármol en concreto o ladrillos, es decir, que la resistencia a compresión con porcentajes bajos de polvo de mármol no se afecta.

Con base a lo anterior, es posible seguir estudiando la aplicación de polvo de mármol en morteros, concreto y fabricación de ladrillos. En la fabricación de ladrillos solo hace falta buscar la dosificación adecuada para que las piezas puedan ser usadas como estructurales, para lograr eso es necesario seguir estudiando este tema y llegar a encontrar la dosificación y agregados adecuados.

4. REFERENCIAS

- Babouri, L., Biskri, Y., Khadraoui, F., El Mendili, Y. (2020), *Mechanical performance and corrosion resistance of reinforced concrete with marble waste*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1838952>
- Betancourt Chávez, J. R., Lizárraga Mendiola, L. G., Narayanasamy, R., Olguín Coca, F. J., Sáenz López, A. (2015), *Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 9(3), 1-12, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193943013004>
- Coordinación General de Minería (2014). *Perfil del Mercado del Mármol*. Ciudad de México: Dirección General del Desarrollo Minero.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R. (2010), *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*, Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 1, Pages 113-117, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>.
- El-Sayed, H. A., Farag, A. B., Kandeel, A. M., Younes, A. A., Yousef, M. M. (2018), *Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, Egypt, and its suitability for cement manufacture*, HBRC Journal, 14:2, 171-179, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.06.002>
- Ferraz, D. F. (2016), *Aditivos reductores de agua para concreto premezclado*. Construcción y Tecnología en Concreto. <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/mayo2016/experto.pdf>
- Ghorbani, S., Tahi, I., Tavakkolizadeh, M., Davodi, A., de Brito, J. (2018), *Improving corrosion resistance of Steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement*, Construction and Building Materials, Vol. 185 Pages: 110-119, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.066>
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E. (2011), *Use of waste marble aggregates in concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 3, Pages: 1167-1171, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Ince, C., Hamza, A., Derogar, S., Ball, R. (2020), *Utilization of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete*, Journal of Cleaner Production, vol. 270, 122-213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122213>
- Khan, Z., Gul, A., Ali Shah, S. A., Qazi, S., Wahab, N., Badshah, E., Naqash, T., Shahzada, K. (2021). *Utilization of Marble Wastes in Clay Bricks: A Step towards Lightweight Energy Efficient Construction Materials*. Civil Engineering Journal, Vol. 7, No. 09, September, 2021, Pages 1488-1500, <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091738>
- Khodabakhshian, A., de Brito, J., Ghalehnavi, 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, Volume 169, Pages 237-251, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>
- Li, L. G., Huang, Z. H., Tan, Y. P., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y. (2019), *Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar*, Journal of Cleaner Production, Volume 210, Pages 55-65, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.332>.
- Morales-Olán, G., et. al. (2015), *Desarrollo de un bloque de construcción a base de desecho de corte generado por la industria marmolera*. Revista Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, pp. 80-83.
- Moreno Juárez, A. N., Ponce Palafox, C., López Montelongo, A. M., Cárdenas Díaz, O. E. (2020), *Aplicación del polvo de mármol para fabricar ladrillo estructural con dimensiones tradicionales en la Comarca Lagunera utilizados en muros de vivienda*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 14(1), 1-10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193962633006>

- Nevarez, C., Rangel, L. (2014), *Estudio experimental realizado para elaborar ladrillos con residuos de mármol (polvo)*. Tesis Licenciatura, Gómez Palacio, Dgo.: Universidad Juárez de Estado de Durango UJED.
- Rahangdale, S., Qureshi, S. (2019), *Study of Compressive Strength of Cement Concrete with Stone and Marble Dust*, International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN: 2319-7064, Vol. 8, No. 1, January 2019, <https://www.ijsr.net/archive/v8i1/ART20194592.pdf>
- Sánchez Pérez, C. J., Castillejo Cans, M. A. (2018), Caracterización geomecánica de rocas dimensionables: casos faja dolomítica y esquistos verdes, yacimiento de canteras tacarigua, C.A. Jornadas de Investigación. Encuentro Académico Industrial. Facultad de ingeniería UCV (JIFI2018). <http://www.ing.ucv.ve/jifi2018/documentos/cienciatierra/CT-017.pdf>
- Santos, A., Villegas, N., Betancourt, J. (2012), *Residuo de mármol como insumo en la construcción civil: diagnóstico de la Comarca Lagunera*. Revista de la construcción, 11(2), 17-26. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200003>
- Shaaban, M. (2020), *The Effects of Marble Dust on the Rheological and Mechanical Properties of Shotcrete*, Engineering, Tehcnology & Applied Science Research, Vol. 10, No. 5, pp. 6334-6348. https://pdfs.semanticscholar.org/3c8f/4b16c8512037e6c97aed1b14d29efb89646d.pdf?_ga=2.66500078.1376494727.1650224112-2140534152.1650224112
- Servicio Geológico Mexicano (2019). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2018. Ciudad de México: Secretaría de Economía. PUBLICACIÓN NO. 48. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/683099/Anuario_2018_Edicion_2019.pdf
- Singh, M., Srivastava, A., Bhunia, D. (2017), *An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry*, Construction and Building Materials, Volume 134, Pages 471-488, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>.
- Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., Bhunia, D. (2017), *A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete*, Journal of Building Engineering, Volume 13, Pages 87-95, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.009>.
- Talah, A., Kharchi, F., Chaid, R. (2015), *Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior*, Procedia Engineering, Volume 114, Pages 685-690, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.010>
- Tobón, J., Gomez, R. (2008). Desempeño del cemento pórtland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza. Dyna. vol.75 no.156 Medellín Sep./Dic. 2008. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532008000300017
- Toubal Seghir, N., Mellas, M., Sadowski, Ł., Krolicka, A., Żak, A., Ostrowski, K. (2019), *The Utilization of Waste Marble Dust as a Cement Replacement in Air-Cured Mortar*. Sustainability, 11 (8), 22-15. <https://doi.org/10.3390/su11082215>
- Verma, M., Kaushal, N., Assistant, A. (2019). *Waste marble Powder/Dust*.
- Wang, Y., Xiao, J., Zhang, J., Duan, Z. (2022), *Mechanical Behavior of Concrete Prepared with Waste Marble Powder*. Sustainability 14, 41-70. <https://doi.org/10.3390/su14074170>
- Yamanel, K., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İsmail İsa, Karahan, O., Duran, C. (2019), *Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar*. Revista de la Construcción. 18(2), 290–300. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.290>

Influencia del curado térmico en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón de ultra alto desempeño con polvo de vidrio

F. G. S. Ferreira^{1*} , L. V. Dias¹ , S. M. Soares² , A. L. Castro³ 

*Autor de Contacto: fgiannotti@ufscar.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.546>

Recepción: 13/07/2021 | Aceptación: 28/02/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto del curado térmico y el uso de empaquetamiento de partículas en compuestos cementosos de ultra alto desempeño (UHPC), con y sin polvo de vidrio. Para ello, los cuerpos de prueba fueron moldeados con 0% y 50% de polvo de vidrio (reemplazo volumétrico al cemento), además de dos mezclas obtenidas a través del empaquetamiento de partículas. Las muestras fueron sometidas a curado térmico y curado húmedo para comparar los efectos. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y absorción por capilaridad. Los resultados indicaron que el curado térmico proporciona ganancia de la resistencia inicial, la aplicación del empaquetamiento de partículas en las dosis de mezcla resultó en una mejora significativa en las propiedades de las muestras y el polvo de vidrio demostró ser un sustituto viable del cemento.

Palabras clave: compuestos cementosos; curado térmico; empaquetamiento de partículas; polvo de vidrio.

Citar como: Ferreira, F. G. S., Dias, L. V., Soares, S. M., Castro, A. L. (2022), "Influencia del curado térmico en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón de ultra alto desempeño con polvo de vidrio", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 184 – 200, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.546>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Caraguatatuba, Brasil.

³ Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor L. V. Dias contribuyó con las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión, escritura del trabajo (30%); S. M. Soares contribuyó a las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión (30%); F. G. S. Ferreira contribuyó con la conceptualización, supervisión, discusión de resultados, redacción y revisión (20%) y A. L. Castro contribuyó con la conceptualización, supervisión, discusión de resultados, redacción y revisión (20%).

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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Influence of thermal curing in the physical and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with glass powder

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the impact of thermal curing and the use of particle packing in ultra-high-performance concrete (UHPC) using glass powder as a partial substitution of Portland cement. For this, specimens with 0% and 50% of glass powder (volumetric substitution to cement) were produced, as well as two mixes obtained by particle packing. The samples were submitted to thermal and standard curing to compare the effects. The samples were tested for compression resistance and capillary water absorption. The results indicate that thermal curing provides a high gain of resistance in early ages, the application of particle packing in the mix design resulted in a significant improvement in the concrete properties and the glass powder presented as a viable substitute for cement.

Keywords: cementitious composite; thermal curing; particle packing; glass powder

Influência da cura térmica nas propriedades física e mecânica de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro

RESUMO

Este trabalho visa avaliar o impacto da cura térmica e do uso de empacotamento de partículas em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD), com e sem pó de vidro. Para tanto, foram moldados corpos de prova com 0% e 50% de pó de vidro (substituição volumétrica ao cimento), além de dois traços obtidos através do empacotamento de partículas. As amostras foram submetidas a cura térmica e a cura úmida para comparação dos efeitos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Os resultados indicaram que a cura térmica proporciona ganho inicial de resistência, a aplicação do empacotamento de partículas na dosagem das misturas resultou em uma significativa melhoria nas propriedades das amostras e o pó de vidro se mostrou um substituto viável para o cimento.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; cura térmica; empacotamento de partículas; pó de vidro

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

Con el fin de satisfacer la creciente demanda de las últimas décadas por estructuras más duraderas y con mayor resistencia mecánica, surgieron los compuestos cementosos de ultra alto desempeño (UHPC). Las primeras referencias al término se atribuyen a Larrard y Sedran, en 1994 (Shi *et al.*, 2015), para referirse a un compuesto de alta resistencia mecánica (superior a 150 MPa) y alta durabilidad (Alkaysi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019). Para conseguir estas características se requiere un alto consumo de cemento (del orden de 1000 kg/m³), una baja relación agua/cemento (a/c) (entre 0,14 y 0,20), que permita reducir la porosidad, y utilizar de un aditivo superplastificante para brindar al material una adecuada trabajabilidad (Ganesh y Murthy, 2019) La inclusión de humo de sílice también provoca cambios en la trabajabilidad, además de aumentar la resistencia final debido a un mejor relleno de los vacíos como de las reacciones puzolánicas generadas (Abbas *et al.*, 2015).

La aplicación de modelos de empaquetamiento de partículas es necesaria para la determinación de la composición de mezclas especiales, como UHPC, ya que permiten mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del compuesto cementoso, a través del aumento de la densidad de la matriz (Castro y Ferreira, 2016). El concepto de empaquetamiento también contribuye al aumento de la densidad con la remoción del agregado grueso (Zhang *et al.*, 2019). Al remover el agregado grueso, se reducen los vacíos internos, del mismo modo que la zona de transición y se obtiene una apariencia más homogénea de tensiones en los granos (Tutikian *et al.*, 2011).

Las primeras referencias publicadas sobre el empaquetamiento de partículas datan de 1892 y se atribuyen a Féret (Castro y Pandolfelli, 2009). En 1930 Furnas desarrolló uno de los primeros modelos de envases, basado en un enfoque discreto. Posteriormente, Andreasen desarrolló un modelo basado en distribuciones continuas. Finalmente, Funk y Dinger (1994) analizaron ambos modelos y comprobaron que estos se acercaban a la misma solución. De esta forma, los autores perfeccionaron su modelo, conocido como modelo de Alfred, obteniendo un análisis considerado como el que genera los mejores resultados (Lopes, 2019).

El procedimiento de curado adoptado también influye en el desarrollo de la resistencia mecánica en materiales a base de cemento como UHPC. El uso de curado térmico, con una temperatura entre 90°C y 400°C, puede maximizar la resistencia mecánica del compuesto cementoso debido a la aceleración de las reacciones puzolánicas, las cuales mejoran la microestructura de la matriz (Ganesh y Murthy, 2019).

El principal efecto del curado térmico en el hormigón está ligado al aumento de densidad generado por la mayor cantidad de C-S-H que se produce (Bahedh y Jaafar, 2018). Este proceso proporciona un aumento significativo de la resistencia del hormigón en edades tempranas, cuando se realiza a temperaturas de 90°C y en ambientes de alta humedad (Heinz *et al.*, 2012). Sin embargo, según Terzian (2005), los hormigones sometidos a procedimientos de curado térmico, a temperaturas superiores a 70°C, pueden presentar reducciones del orden del 10% al 20% en su resistencia final. La incorporación de adiciones minerales puede ayudar a obtener un mejor empaquetamiento de las partículas y también contribuir a la reducción del impacto ambiental. Se sabe que el proceso de fabricación del cemento genera un gran impacto ambiental, se liberan alrededor de 0.8 ton de CO₂ para producir una tonelada de cemento (Mehta y Ashish, 2020). El alto consumo de cemento para la producción de UHPC genera un impacto ambiental sumamente significativo. Por tanto, es interesante buscar un sustituto viable del cemento que no genere un daño significativo en las propiedades del composite. El polvo de vidrio tiene características que lo convierten en un posible sustituto del cemento, ya que posee una importante actividad puzolánica por su alto contenido en sílice (SiO₂) y su estructura amorfa, además de su abundancia: en 2005 EE.UU. generó 12,8 millones de toneladas de residuos, de los cuales solo se reciclaron 2,75 millones (Schwarz *et al.*, 2008); en 2007 la Unión Europea generó alrededor de 25,8 Mt de residuos de vidrio (Abdollahnejad

et al., 2017) y en 2008 Brasil consumió 5,5 kg/habitante. de envases de vidrio, de los cuales el 80% no fueron reciclados (IPEA, 2012).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los efectos del curado térmico sobre las propiedades físicas y mecánicas de UHPC con y sin la inclusión de polvo de vidrio.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Materiales

En esta investigación se utilizaron como aglomerantes cemento Portland de alta resistencia inicial (CPV ARI), humo de sílice y polvo de vidrio obtenido de la molienda de botellas de color ámbar, que luego fue tamizado a través de un tamiz de malla #200 (partículas menores a 75 μm). Como agregado fino se utilizó arena de cuarzo natural. Además, se utilizó sílice molida (SM200) como relleno, un aditivo superplastificante a base de policarboxilatos para proporcionar una trabajabilidad adecuada debido a la baja relación agua/ligante considerada y un aditivo reductor de retracción para evitar el agrietamiento de la matriz. Las características de los materiales granulares constituyentes, considerados en la producción de UHPC, se presentan en las Tablas 1 a 4.

Tabla 1. Características físicas del cemento.

Parámetro	Método	Valor obtenido	Valor de referencia NBR 16697 (ABNT, 2018)
Masa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,16 g/cm ³	-
Inicio de fraguado	NBR 16607 (ABNT, 2018)	135 min	≥ 60 min
Fin de fraguado	NBR 16607 (ABNT, 2018)	210 min	≤ 600 min
Agua para pasta de consistencia normal	NBR 16606 (ABNT, 2018)	30,0%	-
% retenido en el tamiz 75 μm	NBR 16372 (ABNT, 2015)	0,1%	≤ 6,0%
Superficie específica - Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2015)	665,0 m ² /kg	-
Resistencia a la compresión	NBR 7215 (ABNT, 2019)	1 día	≥ 14,0 MPa
		3 día	≥ 20,0 MPa
		7 día	≥ 34,0 MPa
		28 días	-

Tabla 2. Características físicas del humo de sílice, del polvo de vidrio y relleno.

Parámetro	Humo de sílice		Polvo de vidrio		Relleno	
	Valor obtenido	Valor de referencia da NBR 13956-1	Valor obtenido	Valor de referencia	Valor obtenido	Valor de referencia
Masa específica	2,25 g/cm ³	-	2,55 g/cm ³	-	2,70 g/cm ³	-
Humedad	Máx. 3,0%	≤ 3,0%	-	-	-	-
% retenido en el tamiz 45 µm	Máx. 10,0%	≤ 10,0%	-	-	-	-
Superficie específica - Blaine	247,0 m ² /kg	-	393,0 m ² /kg	-	234,0 m ² /kg	-
Índice de actividad puzolánica	Mín. 105,0%	≥ 105,0%	6,4 MPa*	6,0 MPa**	-	-

* prueba realizada utilizando la metodología de la NBR 5751 (ABNT, 2015).

** valor de referencia de la NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabla 3. Composición química de los materiales.

Componente	Materiales (valores em % de massa)			
	Cemento	Humo de sílice	Polvo de Vidrio	Arena
Pérdida por ignición (PI)	4,05 (≤ 6,50)*	3,60(≤ 6,00)**	0,58	0,58
Óxido de calcio(CaO)	61,40	<0,20	9,10	0,071
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4,31	<0,20	3,70	3,40
Dióxido de silicio (SiO ₂)	23,00	94,10	74,00	94,00
Trióxido de azufre (SO ₃)	2,97 (≤4,5)*	-	-	-
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,49	<0,50	0,42	0,67
Óxido de potasio (K ₂ O)	0,96	1,28	0,56	1,20
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,52	-	-	-
Óxido de estroncio (SrO)	0,27	<0,20	0,039	-
Ion de cloro (Cl ⁻)	0,12	-	-	-
Dióxido de torio (ThO ₂)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Uraninita (U ₃ O ₈)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Dióxido de titanio (TiO ₂)	-	<0,20	-	0,35
Óxido de cromo (III) (Cr ₂ O ₃)	-	-	-	0,049
Óxido de magnesio (MgO)	-	-	0,74	-
Óxido de rubidio (Rb ₂ O)	-	-	0,016	-
Óxido de sodio (Na ₂ O)	-	-	11,00	0,37

* Valores de referencia de la NBR 16697 (ABNT, 2018).

** Valores de referencia de la NBR 13956-1 (ABNT, 2012).

Tabla 4. Características físicas del agregado fino.

Parámetro	Método	Valor obtenido
Absorción de agua	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,64%
Masa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,56 g/cm ³
Masa unitaria	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475,78 kg/m ³
Masa unitaria compactada	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1617,83 kg/m ³
Impurezas orgánicas	NBR NM 49 (ABNT, 2006)	Solución más clara que la estándar
Material fino que pasa por el tamiz de 75 µm, por lavado	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,66%

La Figura 1 muestra la distribución granulométrica de cemento, humo de sílice, polvo de vidrio, agregado fino (arena de cuarzo) y relleno (SM200). Hay un d50 de 0,8 µm para humo de sílice, 7 µm para cemento, 15 µm para polvo de vidrio, 32 µm para relleno y 270 µm para agregado fino.

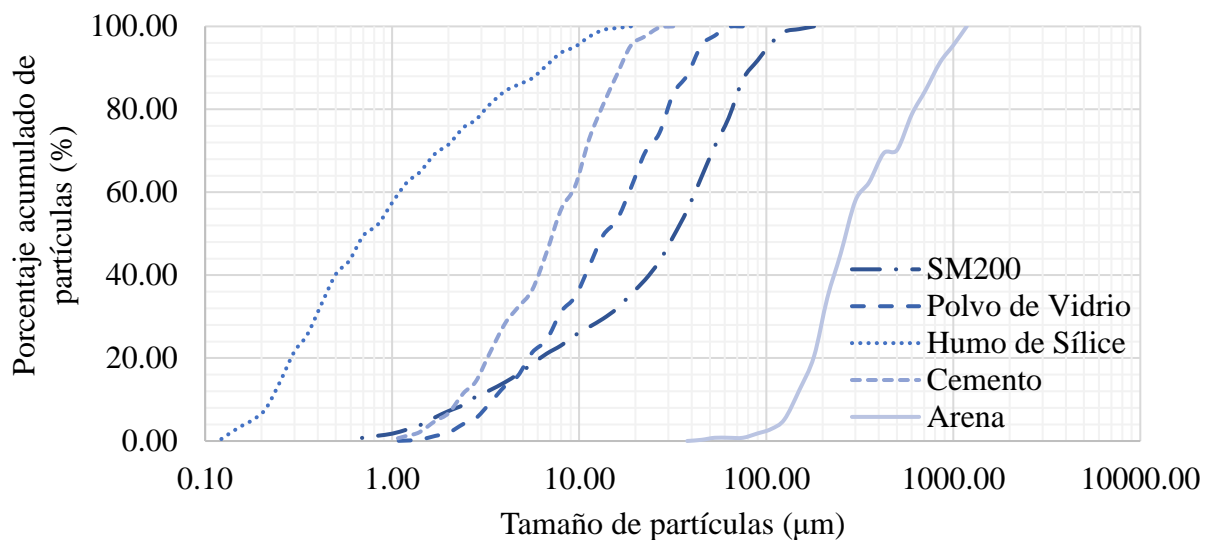


Figura 1. Distribución de tamaños de los materiales granulares que componen el UHPC.

2.2 Métodos

Para la producción de todas las mezclas UHPC, se adoptó una relación agua/ligante fija de 0,18. Inicialmente se produjeron dos dosificaciones: una como referencia (REF), con 0% de polvo de vidrio, y otra con 50% de polvo de vidrio (VD50) en reemplazo volumétrico por cemento; en ambas mezclas se consideró la incorporación de humo de sílice, en un contenido del 8% con relación a la masa de cemento de la mezcla de referencia. Posteriormente, se optimizó la dosificación del VD50 con base en el concepto de empaquetamiento de partículas, aplicando el modelo de Alfred (Ecuación 1).

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde: CPFT es el porcentaje acumulativo de partículas de partículas más pequeñas que D_p , D_p es el diámetro de la partícula, D_L es el diámetro de la partícula más grande en la distribución, D_S es el diámetro de la partícula más pequeña en la distribución y q es una constante, designado por módulo de distribución de tamaño de partícula.

El valor del coeficiente de distribución utilizado en la optimización de la mezcla VD50 se determinó considerando la distribución granulométrica discreta y las proporciones de los materiales que componen la mezcla. Así, se obtuvo la curva de distribución granulométrica experimental de la mezcla y, aplicando el modelo de Alfred, se obtuvo la curva teórica. Mediante un proceso iterativo de ajuste de la curva teórica a la curva experimental, buscando obtener el máximo coeficiente de correlación entre ellas, se determinó el valor del coeficiente de distribución ($q = 0,17$; $R^2 = 0,9913$).

La composición de la mezcla optimizada se determinó mediante un proceso de optimización matemática, que utilizó como datos de entrada la distribución granulométrica discreta de los materiales constituyentes de la mezcla y el coeficiente de distribución determinado para el VD50. De forma iterativa, el programa calcula el diámetro de las partículas más pequeñas y más grandes presentes en la mezcla, proporcionando la curva de distribución granulométrica teórica del modelo de empaquetamiento adoptado (modelo de Alfred). Simultáneamente, se ajusta el contenido de cada material constituyente para obtener el máximo coeficiente de correlación entre las curvas teórica y experimental. Al final del proceso, la composición de cada material granular constituyente de la mezcla optimizada se da en términos de porcentaje, en masa.

Así, con la ayuda de un editor de hojas de cálculo, utilizando la herramienta solver, se determinó la proporción óptima de los materiales constituyentes de la mezcla optimizada, identificada como VD50E. Como puede verse en la Figura 2, el rango granulométrico entre la arena y el polvo de vidrio no está ocupado por ninguna partícula de los materiales granulares constituyentes iniciales. Por esta razón, con el fin de aumentar la eficiencia del empaque de la mezcla seleccionada, se incluyó el relleno (SM200) en la lista de materiales de la mezcla (Figura 3), generando una segunda mezcla optimizada basada en el concepto de empaque de partículas (VD50SM), aplicando el modelo de Alfred y el valor del coeficiente de distribución determinado.

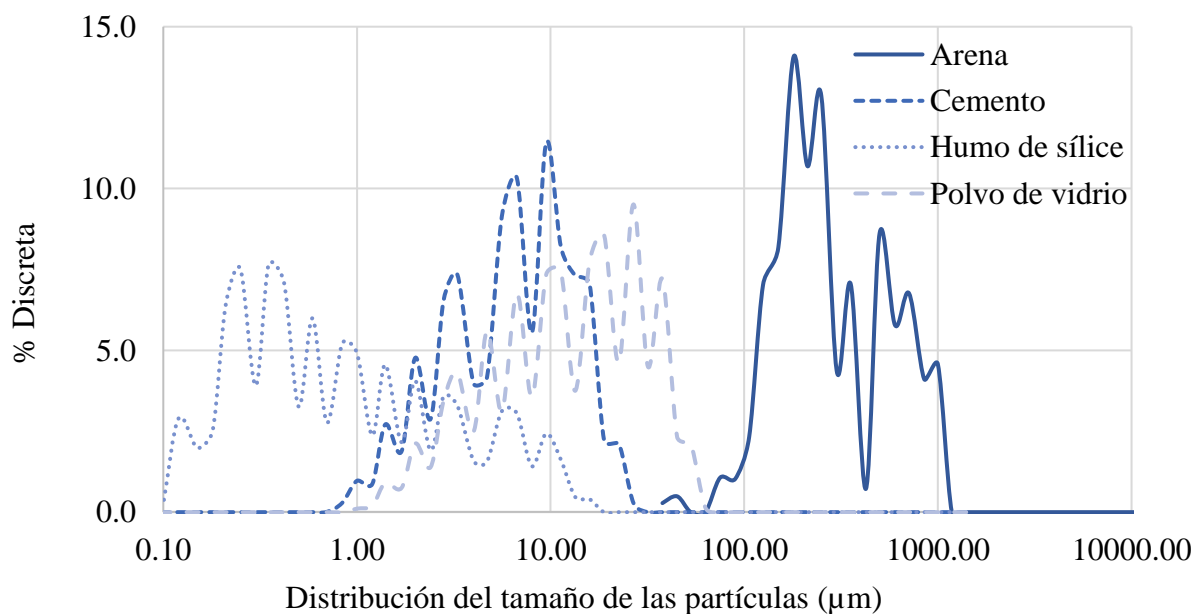


Figura 2. Distribución granulométrica discreta de materiales sin SM200.

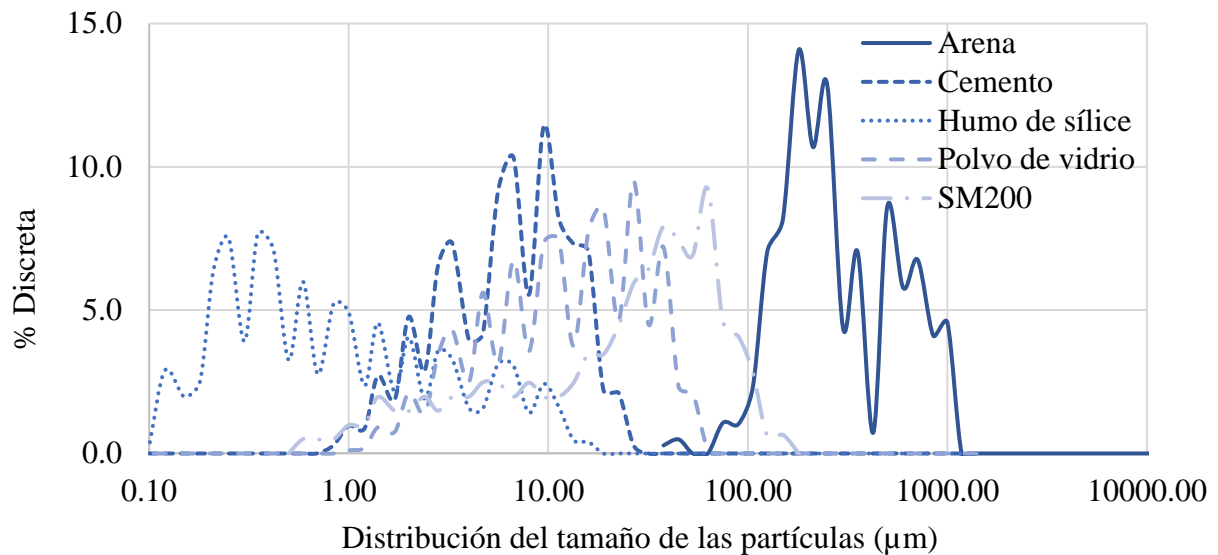


Figura 3. Distribución granulométrica discreta de materiales con SM200.

La Tabla 5 muestra la mezcla unitaria (en masa), el índice de consistencia y el consumo de cemento para las características estudiadas. La consistencia se midió siguiendo la NBR 13276 (ABNT, 2016). Cabe señalar que el contenido de aditivo superplastificante se determinó con el fin de obtener una consistencia de (380 ± 10) mm (consistencia fluida) para las mezclas REF y VD50, manteniendo el mismo contenido de superplastificante en la elaboración de las mezclas optimizadas, con el fin reducir las variables de proceso. El contenido de aditivo reductor de la contracción se adoptó en base a las recomendaciones del fabricante. La compatibilidad entre los aglutinantes y los aditivos se verificó mediante el ensayo de mini-slump (Kantro, 1980).

Tabla 5. Mezcla unitaria, índice de consistencia y consumo de cemento del UHPC producido.

Mezclas	Cemento	Humo de sílice	Polvo de vidrio	Arena	Relleno	Agua	SP*	RR**	Consistencia (mm)	Consumo de cemento (kg/m ³)
REF	1,00	0,08	0,00	1,07	0,00	0,18	0,02	0,01	380	1.000
VD50	1,00	0,16	0,81	2,15	0,00	0,18	0,04	0,02	385	500
VD50E	1,00	0,43	0,46	2,11	0,00	0,18	0,04	0,02	345	510
VD50SM	1,00	0,29	0,40	2,01	0,30	0,18	0,04	0,02	323	514

*Aditivo superplastificante.

**Aditivo reductor de la contracción.

Luego se moldearon manualmente cuerpos de prueba cilíndricos, con dimensiones de 50 mm x 100 mm, siguiendo un procedimiento de mezcla de materiales desarrollado durante la investigación y adecuado para cada una de las diferentes mezclas (Figura 4). En la producción de la mezcla VD50SM, el polvo de vidrio y el relleno se pesaron por separado y luego se empaquetaron en el mismo paquete y se homogeneizaron durante aproximadamente 2 minutos antes de agregarlos a la mezcla.

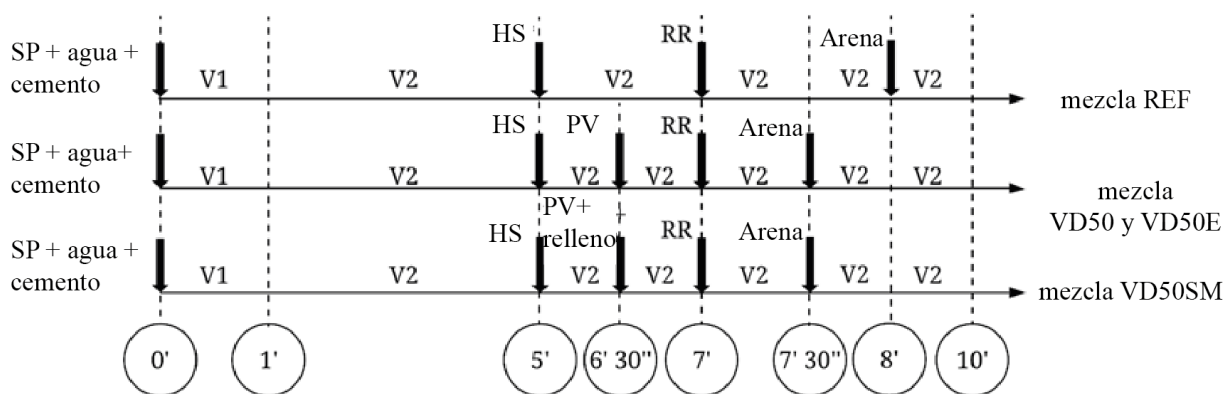


Figura 4. Procedimiento de mezcla de las dosificaciones, donde V1 y V2 representan, respectivamente, las velocidades baja y alta del mezclador.

Luego del moldeado, los cuerpos de prueba fueron colocados en una cámara aclimatada, donde permanecieron por un tiempo aproximado de 48 horas, hasta su desmoldeo. Los cuerpos de prueba fueron luego sometidos a sus respectivos procedimientos de curado. Para realizar el curado térmico (CT), las muestras se colocaron en un recipiente apropiado lleno de agua, con el fin de garantizar que todos los cuerpos de prueba estuvieran completamente sumergidos. Este recipiente se colocó en un horno sin ventilación, que se calentó a $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$ durante dos horas, lo que corresponde a una velocidad de calentamiento de aproximadamente 35°C/h . Luego de este período de calentamiento, las muestras permanecieron en el horno por 24 horas, momento en el cual fueron retiradas y llevadas a una sala aclimatada, permaneciendo en este ambiente por un período de 24 horas. Finalmente, las probetas se colocaron en un recipiente con agua saturada de cal hasta el envejecimiento del ensayo. Otro grupo de cuerpos de prueba fue sometido a curado por inmersión (CI) en agua saturada con cal.

Luego se verificó la resistencia mecánica de los cuerpos de prueba a través del ensayo de compresión axial, conforme a la NBR 5739 (ABNT, 2018), a las edades de 7, 28 y 180 días, considerando 8 cuerpos de prueba por mezcla (4 para CT y 4 para CI). Además, se evaluó la absorción de agua por capilaridad, según NBR 9779 (ABNT, 2012), a los 28 días de edad, considerando 6 ejemplares por mezcla (3 para CT y 3 para CI). Los resultados obtenidos se analizaron mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y en los casos en que $F > F_{\text{crítica}}$, indicando que existen diferencias estadísticas en el grupo, se utilizó la prueba de Tukey para verificar qué muestras eran diferentes al resto del grupo.

3. RESULTADOS

3.1 Resistencia a la compresión

En la Figura 5, se presentan gráficamente los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas estudiadas. Los valores corresponden al promedio de los cuatro valores individuales obtenidos de los cuerpos de prueba ensayados a las edades de interés, es decir, a los 7, 28 y 180 días.

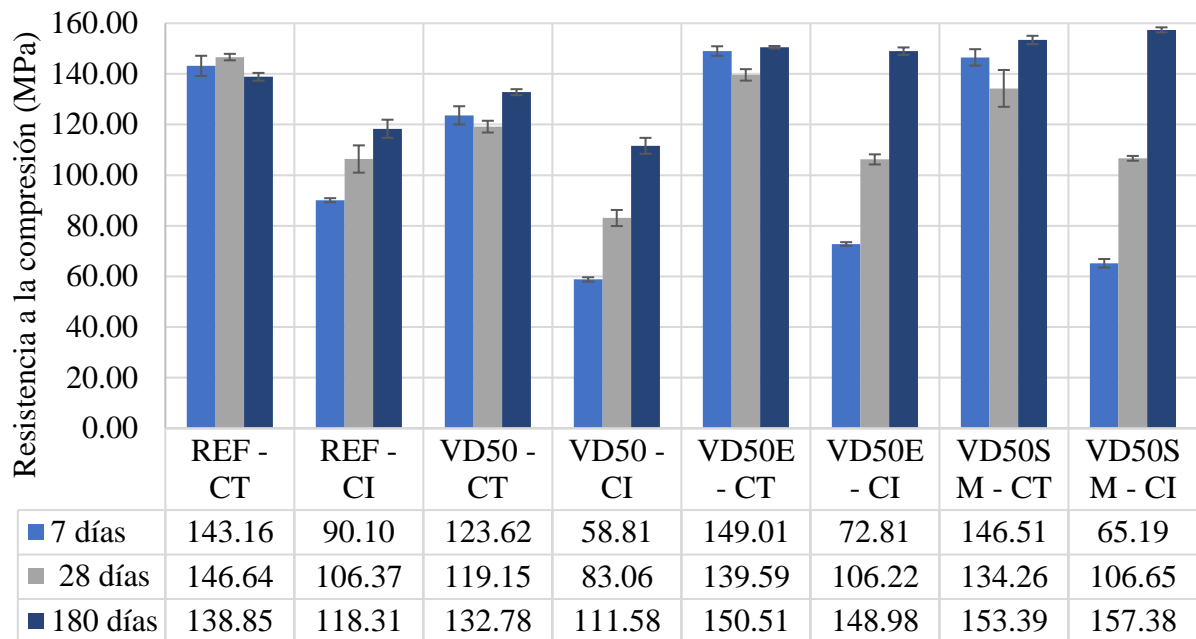


Figura 5. Resistencia a la compresión de los UHPC producidos.

Comparando los diferentes tipos de curado, a los 7 días de edad, es posible observar que las muestras sometidas a CT alcanzaron valores de resistencia cerca de 2 veces superiores las muestras sometidas a CI, con excepción de la mezcla REF, que tuvo una resistencia alrededor de 1,6 veces superior. Esta ganancia de resistencia puede atribuirse principalmente a la aceleración de las reacciones de hidratación del cemento y de las reacciones puzolánicas de las adiciones minerales incorporadas, debido a la exposición a la temperatura de $(90\pm 5)^{\circ}\text{C}$ en el curado térmico. Sin embargo, esta ganancia no es tan expresiva a edades más avanzadas (a los 180) días la relación CT/CI varió entre 0.97 y 1.17; lo que puede explicarse porque el curado térmico sólo anticipa la resistencia final del composite, teniendo poco impacto en la resistencia en edades posteriores, especialmente en las dosificaciones optimizadas a través del empaquetamiento de partículas. Un comportamiento similar fue observado por otros autores que evaluaron el desempeño de las mezclas UHPC bajo diferentes condiciones de curado. Heinz *et al.* (2012) analizaron el comportamiento mecánico de UHPC utilizando probetas cúbicas, sometidas a curado térmico, obteniendo valores de resistencia de 232,5 MPa, mientras que a los 7 días de edad se obtuvo un valor de 136,3 MPa cuando curado por inmersión (1,76 veces mayor); a los 28 días se obtuvieron resistencias de 232,8 MPa (CT) y 216,1 MPa (CI) (1,08 veces superior). Sokolovicz (2020) investigó el comportamiento de UHPC sometidas a curado térmico y obtenidas por empaquetamiento de partículas, obteniendo resistencias 1,25 veces superiores los 7 días y 1,13 a los 28 días, con muestras sometidas a curado por inmersión.

En la Figura 5 también se puede observar que hubo pérdida de resistencia entre los 7 y 28 días en las muestras sometidas a CT. Sin embargo, dicha pérdida no es significativa según el análisis estadístico ANOVA y la prueba de Tukey. Melo (2000) atribuyó esta pérdida de resistencia a los cambios generados en la microestructura del hormigón debido al proceso acelerado de hidratación del cemento. También es posible observar una recuperación de la resistencia a edades más avanzadas (180 días), lo que puede atribuirse a la actividad puzolánica del humo de sílice. Además, como verificaron Du y Tam (2015), las reacciones puzolánicas del polvo de vidrio son más lentas en comparación con el proceso de hidratación del cemento, hecho que también puede haber contribuido a la posterior recuperación de la resistencia de las muestras con la incorporación de este material fino.

En las muestras optimizadas a través del empaquetamiento de partículas, inicialmente no produjo hubo una ganancia de resistencia significativa en relación con las mezclas dosificadas tradicionalmente. A los 7 días de edad, las resistencias de las muestras de la mezcla VD50E y VD50SM son inferiores a las de referencia, sin embargo, son estadísticamente iguales a la resistencia de la mezcla VD50. Este hecho se explica por el menor consumo de cemento de las mezclas VD50, VD50E y VD50SM con relación a la mezcla de REF, perjudicando el comportamiento mecánico de estas mezclas a edades tempranas. A edades más avanzadas se observa un aumento significativo de la resistencia de las muestras optimizadas. Lopes (2019) también observó ganancias significativas de resistencia después de 28 días de edad en hormigones optimizados mediante empaquetamiento de partículas y las atribuyó al fortalecimiento de las zonas de transición por adiciones minerales. Esta justificación también puede aplicarse en este caso, ya que hubo un alto consumo de humo de sílice en las mezclas optimizadas. Sokolovicz (2020) evaluó el comportamiento mecánico de UHPC empacado y sometido a curado húmedo, obteniendo resistencias de 115.30 MPa, 138.60 MPa y 158.9 MPa, a los 7, 28 y 91 días, respectivamente. En este caso, se observa un desarrollo más uniforme de la resistencia en el tiempo, lo que puede explicarse por el hecho de que las muestras presentan un menor consumo de humo de sílice y porque no tienen la incorporación de polvo de vidrio, que tiene una actividad puzolánica más lenta, como se ha mencionado anteriormente. También se observa que la resistencia final obtenida por el autor se aproxima a la obtenida en este trabajo.

Cabe destacar que el desarrollo de la resistencia a la compresión del UHPC estudiado se produce debido a la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica del humo de sílice y del polvo de vidrio. Dependiendo del tipo y contenido de adición mineral utilizada y el régimen de curado adoptado, puede producirse una ganancia significativa de resistencia a edades superiores a los 28 días (como se puede ver en la Figura 5 para la resistencia a los 180 días), hecho que debe tenerse en cuenta en el diseño de estructuras de hormigón.

3.2 Absorción de agua por capilaridad

En la Figura 6 se presentan gráficamente los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad obtenidos para las dosificaciones producidas. Los valores corresponden al promedio de los tres valores individuales obtenidos de los cuerpos de prueba ensayados a la edad de 28 días.

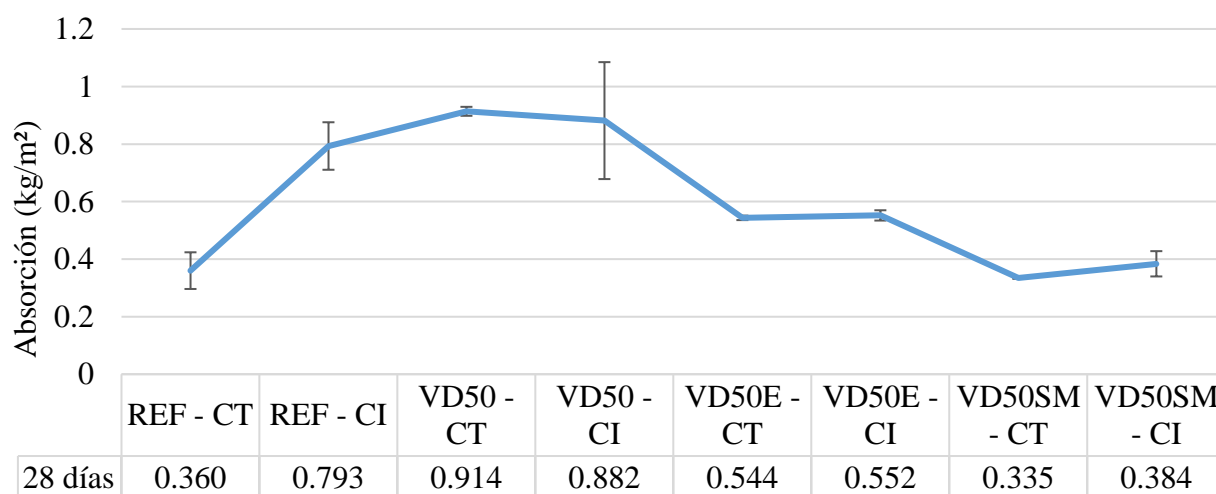


Figura 6. Absorción de agua por capilaridad de los UHPC producidos.

A partir de la Figura 6, es posible observar que los niveles más bajos de absorción de agua por capilaridad se obtuvieron en las muestras optimizadas mediante empaquetamiento de partículas, considerando el uso de SM200 (VD50SM). Este hecho puede explicarse por el efecto de relleno

que proporciona el material, lo que permite obtener una microestructura más densa y homogénea, además de generar una estructura de poros desconectados, reduciendo la absorción de agua por parte del material (Tam et al, 2012). Además, se observa que las muestras optimizadas (VD50E y VD50SM), en general, absorbieron menos agua que las dosificadas tradicionalmente, lo que puede explicarse tanto por el mejor llenado de los vacíos proporcionado por el empaque de partículas como por el alto consumo de humo de sílice, que además del efecto *filler* aporta una cantidad adicional de CSH generado por la reacción puzolánica, obstruyendo los poros presentes en el material (Tam et al, 2012). Este efecto también explica por qué, en general, las muestras sometidas a CT mostraron menor absorción de agua que las sometidas a IC, ya que este procedimiento de curado aumenta la cantidad de CSH a edades tempranas debido a la aceleración de las reacciones de hidratación del cemento.

Cabe destacar la gran dispersión de resultados observada para algunos UHPC estudiados, como es el caso de REF-CI y VD50-CI. Como los valores de absorción de agua por capilaridad obtenidos para estas mezclas son muy bajos (0,793 kg/m² para REF-IC y 0,882 kg/m² para VD50-CI), se aprecia una pequeña diferencia entre los valores obtenidos para los cuerpos de prueba de las muestras puede resultar en una desviación estándar considerable, como se observa en el presente estudio, correspondiente a coeficientes de variación de 10,4% y 26,0%, respectivamente).

Así, con base en los resultados obtenidos, se constató que el procedimiento de ensayo prescrito en la NBR 9779 (ABNT, 2012) para determinar la absorción de agua por capilaridad en morteros y hormigones endurecidos no era adecuado para aplicación en UHPC, ya que, debido a la baja cantidad de poros presentes en la microestructura del hormigón, cuerpos de prueba no presentaron diferencias significativas de masa después de largos periodos en el horno o de exposición al agua.

3.3 Análisis estadístico

Las tablas 6 a la 9, que se presentan a continuación, muestran los resultados de los análisis estadísticos realizados para los resultados de resistencia mecánica y absorción de agua por capilaridad de los UHPC producidos. Cabe destacar que Sí y No indican si existe o no una diferencia significativa.

Tabla 6. Resistencia mecánica a los 7 días - diferencia significativa ($F = 68,87$ y $F_{obtenido} = 2,42$).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí
REF - CI		Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
VD50 - CT			Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
VD50 - CI				Sí	No	Sí	No
VD50E - CT					Sí	No	Sí
VD50E - CI						Sí	No
VD50SM - CT							Sí

De acuerdo con la Tabla 6, es posible observar que hubo una diferencia significativa en los valores de resistencia a la compresión (a los 7 días de edad) de las muestras sometidas a CT, en comparación con las muestras después de IC. La incorporación de polvo de vidrio proporcionó una disminución significativa en la resistencia mecánica de UHPC.

Tabla 7. Resistencia mecánica a los 7 días - diferencia significativa ($F = 9,07$ e $F_{obtenido} = 2,42$).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí
REF - CI		No	No	Sí	No	No	No
VD50 - CT			Sí	No	No	No	No
VD50 - CI				Sí	No	Sí	No
VD50E - CT					Sí	No	No
VD50E - CI						No	No
VD 50SM - CT							No

A los 28 días de edad (Tabla 7), se puede observar que las mezclas VD50-CT, VD50SM-CT y VD50SM-CI no presentaron diferencias significativas con relación a la mayoría de las ADCC estudiadas. Para la mezcla VD50SM, con la incorporación de humo de sílice, polvo de vidrio y relleno, el procedimiento de curado utilizado (CT o CI) no implicó diferencias significativas en cuanto a la resistencia mecánica. Las muestras con incorporación de polvo de vidrio y sometidas a CT no mostraron diferencias significativas con relación a la muestra de referencia tras el CT.

Tabla 8. Resistencia mecánica a los 7 días - diferencia significativa ($F = 19,84$ e $F_{obtenido} = 2,42$).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sí	No	Sí	No	No	No	Sí
REF - CI		No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
VD50 - CT			Sí	No	No	Sí	Sí
VD50 - CI				Sí	Sí	Sí	Sí
VD50E - CT					No	No	No
VD50E - CI						No	No
VD50SM - CT							No

De acuerdo con la Tabla 8, es posible observar que hubo una diferencia significativa en los valores de resistencia a la compresión (a los 180 días de edad) de las muestras sometidas a CT, en comparación con las muestras después del CI en las mezclas REF y VD50. En los demás, el tipo de curado no interfirió significativamente en la resistencia. En las muestras sometidas a CT, la incorporación de polvo de vidrio no proporcionó una diferencia significativa en la resistencia a la compresión de los UHPC.

Tabla 9. Absorción de agua a los 28 días - diferencia significativa.

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
REF - CI		No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
VD50 - CT			No	Sí	Sí	Sí	Sí
VD50 - CI				Sí	Sí	Sí	Sí
VD50E - CT					No	No	No
VD50E - CI						No	No
VD50SM - CT							No

De acuerdo con la Tabla 9, es posible observar que no hubo diferencia significativa en los valores de absorción de agua de las muestras sometidas a CT, en comparación con las muestras después de CI, excepto en la muestra sin polvo de vidrio (REF). La incorporación de polvo de vidrio no aportó una diferencia significativa en la absorción de agua de los UHPC sometidos a CT (excepto la mezcla VD50). En cuanto a las mezclas en las que se busca un mejor empaquetamiento (VD50E y VD50SM), la disminución de los valores de absorción de agua por capilaridad fue significativa, en comparación con la mezcla VD50, independientemente del tipo de curado adoptado.

4. CONCLUSIONES

A la vista de los datos obtenidos, se concluye que:

1. El procedimiento de curado térmico adoptado es viable y tiene beneficios principalmente para aumentar la resistencia del hormigón, tanto en edades tempranas como en edades más avanzadas, especialmente si se aplica a compuestos cementicios con incorporación de polvo de vidrio.
2. El modelo de empaquetamiento de partículas utilizado en la optimización de las mezclas resultó eficaz tanto para aumentar la resistencia del hormigón como para reducir su absorción de agua, con un efecto significativo a edades más avanzadas.
3. El uso de sílice molida (SM200) no generó ganancias de resistencia significativas. Sin embargo, se observó una reducción en la absorción de agua, lo que hace que su uso sea válido.
4. La incorporación de altos niveles de polvo de vidrio (50%) tiende a provocar una disminución de la resistencia mecánica de los UHPC en un 35%, 22% y 5% con relación al compuesto de referencia a edades de 7, 28 y 180 días, respectivamente, indicando la aplicabilidad del polvo de vidrio como sustituto parcial del cemento.
5. La prueba de absorción de agua por capilaridad por el método de prueba prescrito en la NBR 9779 (ABNT, 2012) no está indicada para evaluar el desempeño del UHPC, se recomienda la elaboración de otro procedimiento que sea apropiado para composites de baja porosidad y/o permeabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el apoyo financiero para la realización de esta investigación y al Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Estado de São Paulo (IPT), por la asistencia en las pruebas de caracterización de los ligantes.

6. REFERENCIAS

- Abbas, S., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2015), *Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages*. Construction and Building Materials. 75: 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- Abdollahnejad, Z., Kheradmand, M., Pacheco-Torgal, F. (2017), *Short-Term Compressive Strength of Fly Ash and Waste Glass Alkali-Activated Cement-Based Binder Mortars with Two Biopolymers*. Journal of Materials in Civil Engineering. 29(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001920)
- Alkaysi, M., El-Tawil, S., Liu, Z., Hansen, W. (2016), *Effects of silica powder and cement type on durability of ultra-high-performance concrete (UHPC)*. Cement and Concrete Composites. 66: 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005>

- 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. (2015). *NBR 5751 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 9779: Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n^o200)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.
- Bahedh, M. A., Jaafar, M. S. (2018), *Ultra High-Performance Concrete Utilizing Fly Ash as Cement Replacement under Autoclaving Technique*. Case Studies in Construction Materials. 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00202>
- Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high-performance concretes*. Revista Ingeniería de Construcción. 31(2):91 – 104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>
- Castro, A. L., Pandolfelli, V. C. (2009), *Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. Cerâmica. 55:18-32. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>
- De Larrard, F., Sedran, T. (1994), *Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model*. Cement and Concrete Research. 24(6):997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- Melo, A. B. (2020), *“Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland”*, Tese (Doutorado),

Universidade de São Paulo, p. 296.

Du, H., Tan, K. H. (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials. 66: 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.092>

Funk, J. E.; Dinger, D. R. (1994), *Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing*. New York: Springer Science Business Media.

Ganesh, P., Murthy, A. R. (2019), *Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high-performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material*. Construction and Building Materials. 197:667-680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.240>

Heinz, D., Urbonas, L., Gerlicher, T. (2012), “*Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC*” in: M. Schimdt, E. Fehling, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Eds.), *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, HiperMat, Kassel, HE, (Germany), pp. 283-290.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). (2012), “*Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos*”. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 27 de março de 2020.

Kantro, D. (1980), *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test*. Cement, Concrete and Aggregates. 2(0):95-102. <https://doi.org/10.1520/CCA10190J>.

Lopes, H. M. T. (2019), “*Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland*”, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, p. 172.

Mehta, A., Ashish, D. K. (2020), *Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100888>

Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N. (2008), *Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash*. Cement & Concrete Composites. 30: 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z. (2015), *A review on ultra-high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design*. Construction and Building Materials. 101:741-751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>

Sokolovicz, B. C. (2020), “*Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais*”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, p. 358.

Tam, C. M., Tam, V. W. Y., Ng, K. M. (2012). *Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong*. Construction and Building Materials. 26:79-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>

Terzian, P. (2005), *Concreto pré-fabricado*. In: Isaia G. C. “*Concreto Ensino Pesquisas e Realizações*”, São Paulo, IBRACON, v.2.

Tutikian B., F., Isaia, G. C., Helene, P. (2011), *Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho*. In: Isaia, G. C. “*Concreto: Ciência e Tecnologia*”, São Paulo, IBRACON.

Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., Hou, D. (2019), *Optimized design of ultra-high-performance concrete (UHPC) with a high wet packing density*. Cement and Concrete Research. 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>

Zhang, H., Ji, T., Lin, X. (2019), *Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high-performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions*. Construction and Building Materials. 211: 688-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>

Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico

R. R. C. Silva^{1*} , C. Bertoldo² 

* Autor de Contacto: rodrigorogerioudorato@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

Recepción: 01/11/2022 | Aceptación: 19/02/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue simular manifestaciones patológicas en muros pantalla a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, proponiendo obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez a través de la propagación de ondas de ultrasonido. Se realizaron ensayos de compresión para determinar resistencia y rigidez, así como ensayos de ultrasonido por el método directo e indirecto sobre hormigones producidos con diferentes concentraciones de polímero sintético. Los resultados obtenidos indicaron una disminución de las propiedades mecánicas y acústicas del hormigón con el aumento de la concentración de polímero sintético en su confección. Los modelos generados por la prueba ultrasónica fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 95%, y las correlaciones establecidas en concreto pueden ser utilizadas en la detección de manifestaciones patológicas in loco.

Palabras clave: muros pantalla; propagación de pulso ultrasónico; fuerza y rigidez.

Citar como: Silva, R. R. C., Bertoldo, C. (2022), "*Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

¹ Laboratorio de Ensayos No Destructivos, Universidad Estatal de Campinas, Campinas/SP, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, Silva, R. R. C., contribuyó a la adquisición de financiamiento actividad, metodología, investigación, elaboración del programa muestra experimental, borrador y redacción original, Pedrosa, C. B. contribuyó a la conceptualización, metodología, supervisión y análisis de datos.

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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Simulation of pathological manifestations in diaphragm wall through ultrasonic wave propagation

ABSTRACT

This research aimed to simulate pathological manifestations in diaphragm wall using concrete produced with different additions of synthetic polymer, in order to obtain models of strength and stiffness prediction through ultrasound wave propagation. Compression tests were performed to determine strength and stiffness, as well as ultrasound tests by direct and indirect method on concrete produced with different concentrations of synthetic polymer. The results suggested a decrease in the mechanical and acoustic properties of concrete with the increase in the concentration of synthetic polymer. The models generated by the ultrasonic test were statistically significant, at 95% confidence level, and the correlations established in concrete can be applied in the detection of pathological manifestations in loco.

Keywords: diaphragm wall ultrasonic wave propagation; strength and stiffness.

Simulação de manifestações patológicas em parede diafragma através de propagação de ondas ultrassônicas

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi simular manifestações patológicas em parede diafragma através de concretos produzidos com diferentes adições de polímero sintético, propondo obter modelos de predição de resistência e rigidez através de propagação de onda de ultrassom. Foram realizados ensaios de compressão para determinação da resistência e rigidez, assim como ensaios de ultrassom pelo método direto e indireto em concretos produzidos com diferentes concentrações de polímero sintético. Os resultados obtidos indicaram queda nas propriedades mecânicas e acústicas do concreto com o aumento da concentração de polímero sintético em sua confecção. Os modelos gerados pelo ensaio ultrassônico foram estatisticamente significativos, ao nível de confiança em 95%, podendo, as correlações estabelecidas em concreto, serem utilizadas na detecção de manifestações patológicas in loco

Palavras chave: parede diafragma; propagação de ondas ultrassônicas; resistência e rigidez.

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

Con el gran crecimiento de las construcciones civiles en las últimas décadas, se han estudiado formas de facilitar la ejecución de grandes obras que enfrentan dificultades por la inestabilidad de los suelos en los que se ubican. Según Hachich et al. (2019), una de las alternativas para ayudar en la excavación del suelo es el uso de un sistema de contención con muro pantalla, el cual consiste en zanjas abiertas en el suelo rellenas de hormigón armado, mantenidas estables mediante el uso de fluidos poliméricos o lodo bentonítico.

El uso de polímeros sintéticos en excavaciones presenta grandes ventajas frente a las formas tradicionales de estabilización de suelos, como el uso de bentonita. Según Mota (2010), podemos citar como ventaja el aspecto económico, el uso de polímeros a pesar de tener un costo mayor, en la adquisición por metro cúbico, en comparación con la adquisición de lodos bentoníticos, su uso en cuanto a cantidad es menor. , es decir, se utiliza menos para obtener mejores rendimientos que las formas tradicionales. Según Mota (2010), podemos mencionar el factor ambiental en cuestión, el uso de polímeros como estabilizadores en excavaciones no genera bioacumulación para el medio ambiente debido a algunos factores como alta solubilidad, sensibilidad química y acciones de los rayos ultravioleta que terminan fragmentando cadenas poliméricas y no generando acumulaciones (Mota 2010).

Estudios realizados por Mota (2010) encontraron que el polímero sintético altamente concentrado puede ser utilizado específicamente para interactuar químicamente con todo tipo de suelo, como base para su estabilización. Su estructura molecular le permite ser completamente soluble en agua, sin alterar su función principal como enlace químico activo en la estabilización de las partículas del suelo.

El uso de este polímero durante las excavaciones debe seguir las recomendaciones de la ABNT-NBR 6122 (2019), con hormigón de densidad entre 2,1 a 2,8 g/cm³ y consumo mínimo de cemento de 400 kg/m³, y fluido estabilizador como polímero con el pH del agua entre 9 y 12, densidad de 1,005 g/cm³ a 1,10 g/cm³ y contenido de arena hasta 4,5%. Según Djelal et al. (2020) una de las patologías resultantes del muro pantalla está relacionada con la mezcla del fluido polimérico durante el hormigonado, aumentando la infiltración de aguas subterráneas desde la masa de suelo después de la ejecución de los paneles, comprometiendo la capacidad de recepción de esfuerzos del hormigón.

Una de las dificultades es el control de los muros pantalla in loco, para verificar si la calidad del hormigón no se vio comprometida por la mezcla con el polímero sintético. De acuerdo con Silva (2020), una de las pruebas utilizadas que no causan daño al sistema de contención de concreto son las no destructivas, como la prueba de ultrasonido. Estudios realizados por Savaliya et al. (2014), mediante ensayos de ultrasonido en estructuras de hormigón, demuestran que el método es preciso para la detección de patologías, con sensibilidad para detectar defectos y permitir una mejor localización de los mismos una vez detectados.

En vista de lo expuesto, en este proyecto se utilizaron ensayos no destructivos de propagación de ondas ultrasónicas, directa e indirectamente, simulando la inspección in situ, con el fin de verificar su sensibilidad en la predicción de las propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) y físicas. (absorción de agua) del hormigón elaborado con diferentes concentraciones de polímero sintético. En vista de los aspectos mencionados, el objetivo de la presente investigación fue simular manifestaciones patológicas en muro pantalla con diferentes adiciones de polímero sintético junto al hormigón, proponiendo modelos de predicción de resistencia y rigidez obtenidos en ensayos de propagación de ondas de ultrasonido, para la evaluación de este sistema de contención in situ.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para la investigación se elaboró hormigón con proporciones de cemento tipo CPII-F con especificaciones según ABNT-NBR 11578 (1997), arena y grava media 01 (1:1.8:2.5), con el cemento medido en masa, los agregados en volumen y relación agua-cemento de 0,6, conforme especificado en el trazado para estructuras de hormigón tipo muro pantalla (ABNT-NBR 6122, 2019). Considerando la mezcla patrón, se adicionaron con relación al cemento diferentes porcentajes de polímero sintético 0%, 20%, 40% y 60%, del tipo granulado aniónico, de alto peso molecular > 21 millones y cadenas largas, utilizado para la floculación. masa (Figura 1a). La caracterización de los agregados se realizó de acuerdo a las recomendaciones de las normas para agregado fino NBR (NM 248, 2003; NM 52, 2009; NM 45, 2006) y agregado grueso NBR (NM 248, 2003, NM 53, 2003, NM 45, 2006). Las muestras fueron sometidas a los 28 días a la prueba de absorción por inmersión, de acuerdo con las especificaciones de la ABNT-NBR 9778 (2015). De acuerdo con la Tabla 1, la caracterización de los agregados está dentro de los límites de aceptabilidad, según ABNT - NBR 7211 (2009).

Tabla 1. Resultados de la caracterización física de pequeños y grandes áridos.

Agregado	Masa específica (kg/m ³)	Masa unitaria (kg/m ³)	Diámetro máximo (mm)	Módulo de finura
Granito	2650	1500	25	6,75
Arena	2590	1310	4,8	1,89

La adición de polímero sintético presentó un comportamiento similar al generado por la adición de agua al concreto, cuando evaluamos la trabajabilidad (valores de Slump Test) y la densidad, es decir, el aumento de las adiciones de polímero provocó un aumento de la trabajabilidad y reducción de la densidad (Tabla 2).

Tabla 2. Ensayo de asentamiento y valores medios de densidad de hormigones producidos con diferentes adiciones de polímero sintético.

Adiciones	Slump Test (mm)	Densidad media (kg.m ⁻³)
0%	180	2223
20%	210	2097
40%	250	1934
60%	260	1900

Después del ensayo de asentamiento, se moldearon 12 probetas cilíndricas (100 mm de diámetro y 200 mm de longitud) y 1 probeta prismática (400 x 400 x 300 mm³) por cada traza, simulando parte de un muro pantalla después de la ejecución, totalizando 48 probetas cilíndricas. y 4 especímenes prismáticos. Las muestras cilíndricas fueron ensayadas por ultrasonido, a los 28 días, por el método directo de propagación de ondas (Figura 1b) y las muestras prismáticas por el método indirecto (Figura 1c), representando la evaluación de la inspección in loco.

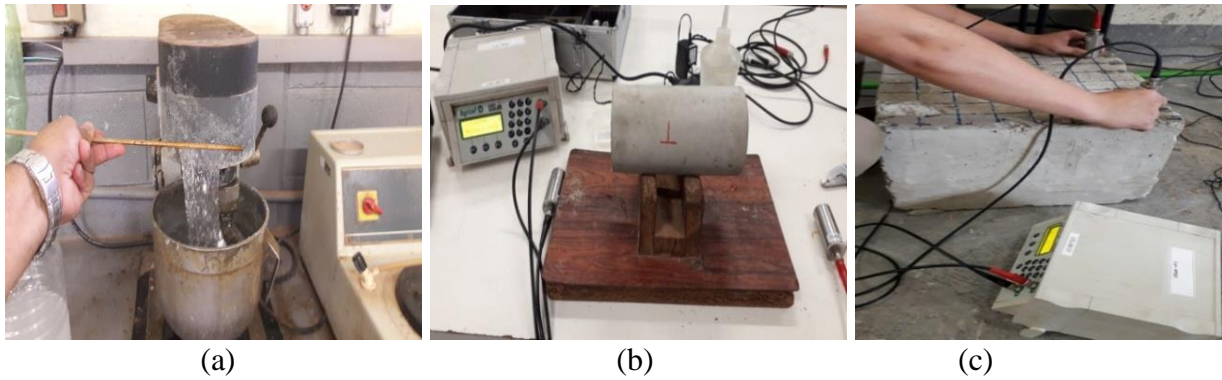


Figura 1. (a) Polímero sintético, (b) muestras cilíndricas sujetas a prueba de ultrasonido directo (c) muestras prismáticas sujetas a prueba de ultrasonido indirecto. Fuente: autores (2021).

Para las pruebas se utilizaron equipos de ultrasonido (USLAB, Agricef, Brasil) y transductores longitudinales de cara plana de 45 KHz de frecuencia. Con los tiempos de propagación de las ondas ultrasónicas (t) fue posible calcular, para cada distancia entre transductores (L), la velocidad directa de propagación de las ondas ultrasónicas (V_D), a través de la ecuación propuesta por la ABNT NBR 8802 (2019) , según la ecuación (1).

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

A los 28 días también se determinó la masa de cada espécimen mediante una balanza de precisión, y con la ayuda de un pie de rey digital se obtuvieron sus dimensiones para calcular el volumen y posteriormente la densidad. A partir de la posesión de la velocidad directa y la densidad del hormigón (ρ) se determinó el coeficiente de rigidez (2).

$$C_{LL} = \rho \cdot V_D^2 \quad (2)$$

Las muestras prismáticas, que representan la evaluación de la factibilidad de inspección de un muro pantalla después de la instalación por el método de propagación de onda indirecta, fueron ensayadas siguiendo la metodología de cálculo propuesta por la norma ABNT-NBR 8802 (2019). La norma brasileña propone una forma de cálculo de la velocidad de propagación ultrasónica por el modo de transmisión indirecta (V_I), cuyo procedimiento consiste en calcular la velocidad a través de una gráfica de tiempo de propagación versus distancia entre transductores Figura (2).

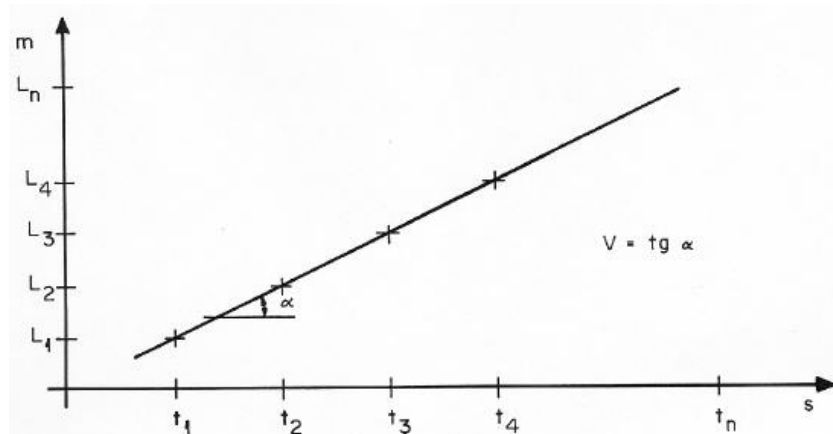


Figura 2. Determinación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas por el método indirecto. Fuente: ABNT-NBR 8802 (2019).

Luego, los especímenes fueron sometidos a la prueba de compresión instrumentada en una máquina de prueba (EMIC) para determinar la resistencia (f_c - ABNT-NBR 5739, 2018) y el módulo de elasticidad (E_{ci} - ABNT-NBR 8522, 2017). Los resultados de las pruebas se utilizaron en la generación de modelos de predicción de propiedades mecánicas a partir de las velocidades de propagación de las ondas de ultrasonido.

Con los resultados de f_c y E_{ci} y los parámetros de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas (V_D), (V_I) y (C_{LL}), se analizaron regresiones para verificar la existencia de modelos estadísticamente significativos entre las propiedades mecánicas y las propiedades acústicas, obtenidos por medios de pruebas de propagación de ondas ultrasónicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las propiedades mecánicas (f_c y E_{ci}) y acústicas (C_{LL} , V_D y V_I) del hormigón también se redujeron a medida que aumentaban las adiciones de polímeros, hecho provocado por el aumento de la porosidad (cantidad de vacíos) del hormigón, tabla (3) , informa los ensayos realizados a las 12 muestras de concreto por cada mezcla realizada.

Tabla 3. Valores mínimo, máximo y promedio de resistencia (f_c), elasticidad (E_{ci}), coeficiente de rigidez (C_{LL}) velocidad directa (V_D) e indirecta (V_I) para las trazas producidas con diferentes adiciones de polímeros.

Adiciones	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)	C_{LL} (GPa)	V_D (m.s ⁻¹)	V_I (m.s ⁻¹)
	Min. Max.	Min. Max. Media	Min. Max. Media	Min. Max. Media	Min. Max. Media
0%	16,9 20,5 17,41	19,58 27,80 23,28	27,23 34,38 30,16	3485 3885 3680	2437 2855 2639
20%	8,32 9,6 8,80	11,44 16,13 13,10	19,87 22,42 21,26	3095 3230 3185	2421 2628 2520
40%	5,53 6,78 6,17	5,80 9,85 7,48	9,81 17,29 13,14	2386 2788 2615	1886 2518 2127
60%	4,13 4,96 4,60	2,03 3,13 2,95	7,88 15,69 12,83	2040 2858 2528	804 1085 935

Para evitar la dispersión, para los análisis estadísticos se utilizaron los promedios de los resultados de los parámetros de resistencia, rigidez y acústica. Los modelos de regresión lineal evaluados mediante análisis de varianza (ANOVA) fueron estadísticamente significativos al 95% de nivel de confianza con (P -value < 0,05), siendo los mejores modelos predictivos para las propiedades de resistencia (f_c) y de rigidez (E_{ci}) del hormigón se obtuvieron a partir del coeficiente de rigidez (C_{LL}) (Cuadro 4).

Los modelos encontrados siguen dentro de los rangos de coeficientes de determinación encontrados en la literatura entre ensayos mecánicos y propagación de ondas. Para la predicción Media de f_c , los coeficientes de determinación (R^2) en los estudios realizados por Mohamad et al., (2016), Silva et al. (2020), varió entre 60 y 98% y, para E_{ci} entre 50 y 96%, (Giacon et al., 2010; Mohamed et al., 2016 y Silva et al., 2020). Correlaciones entre los parámetros de rigidez (C_{LL}) y las propiedades mecánicas de resistencia (f_c) y módulo de elasticidad (E_{ci}) obtenidas en ensayos de ultrasonido y compresión, respectivamente, fueron encontradas por Giaccon et al., 2010 y Silva (2020), con modelos lineales y valores de R^2 en el rango de 85% a 97% para E_{ci} y de 79% a 95% para f_c .

Los valores de error absoluto de resistencia y módulo de elasticidad del hormigón oscilan entre el

25 % y el 50 % cuando se basan en modelos con parámetros de propagación de ondas (Bungey y Millard, 2006). En esta investigación, los errores absolutos encontrados (9,70% a 20% - Tabla 4) están por debajo de los encontrados en la literatura, indicando que los modelos de predicción de resistencia y rigidez son válidos en la evaluación de la calidad del hormigón utilizado en muros diagrama, usando parámetros acústicos de propagación de onda.

Tabla 4. Modelos de correlación entre parámetros de velocidad directa (V_D), velocidad indirecta (V_I) y coeficiente de rigidez (C_{LL}) con la resistencia a compresión (f_c) y el Módulo de Elasticidad inicial (E_{ci}).

Parámetro	Modelo	P-Valor	R ² (%)	Error de estimación	Error absoluto* (%)
$f_c \times V_D$	$f_c = -20,34 + 0,0098 * V_D$	0,03	92,81	1,70	18,40
$f_c \times V_I$	$f_c = -5,25 + 0,0068 * V_I$	0,04	81,65	1,87	20,30
$f_c \times C_{LL}$	$f_c = -3,96 + 0,68 * C_{LL}$	0,025	97,46	1,57	9,70
$E_{ci} \times V_D$	$E_{ci} = -35,13 + 0,015 * V_D$	0,01	96,91	1,83	18,90
$E_{ci} \times V_I$	$E_{ci} = -11,68 + 0,012 * V_I$	0,04	89,00	1,90	20,60
$E_{ci} \times C_{LL}$	$E_{ci} = -8,56 + 1,05 * C_{LL}$	0,020	97,97	2,14	12,37

* relación entre el error estimado y el valor medio.

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos de la absorción por inmersión y la velocidad longitudinal de las muestras ensayadas después de la saturación. A través de los resultados obtenidos, se observa que la adición de polímero sintético incrementó la absorción de agua (Cuadro 5), dejando mayor cantidad de vacíos (poros) después del proceso de secado. Esto ocurre debido a la liberación de agua de curado interna, lo que conduce al deshinchamiento de las partículas de polímero, provocando cambios en la estructura porosa de los materiales cementosos (Araújo y May, 2019).

Tabla 5. Valores de absorción de buzamiento y velocidad de avance promedio (DV), para las trazas producidas con diferentes adiciones de polímero sintético.

Muestra	Absorción (%)	V_D ($m.s^{-1}$)
0%	12,0	3087
20%	12,4	2777
40%	17,3	2291
60%	18,4	1846

Debido al cambio en la cantidad de agua absorbida, se producen cambios en las propiedades acústicas (Cuadros 3 y 5), se observa que las velocidades de propagación del sonido disminuyen a medida que aumenta la cantidad de polímero utilizado, los poros vacíos existentes en el concreto seco representan un factor significativo en la transmisión de ondas sonoras, ya que la velocidad del pulso ultrasónico es menor en el aire que en el sólido (Godinho, et al., 2020), con esto se explica el hecho de que el polímero aumente la cantidad de poros, reduciendo la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en las muestras.

La regresión entre la velocidad del ultrasonido y la absorción mostró un modelo con R² de 92% (Figura 3) y P-Valor de 0,04, inferior a 0,05, demostrando una relación estadísticamente significativa entre los parámetros, con un nivel de confianza de 95,0%, obtenido por ANOVA

análisis estadístico. Los resultados obtenidos indican que la técnica de propagación de ondas es sensible al aumento del contenido de agua dentro de las muestras de hormigón, provocado por el aumento de la porosidad tras el secado del polímero sintético dentro de la matriz de cemento, reduciendo su velocidad de ultrasonido. De esta forma, el hormigón tendrá un aumento de vacíos (poros) y estará sujeto a una mayor absorción de agua y una menor densidad y propiedades mecánicas. El agua actúa como principal portador del medio erosivo en el hormigón, por lo que su desempeño, como barrera para reducir el transporte de agentes potencialmente causantes de corrosión de la armadura, está relacionado con su porosidad (Dudhal, 2016; Liu et al., 2020) .; Matiko, 2000).

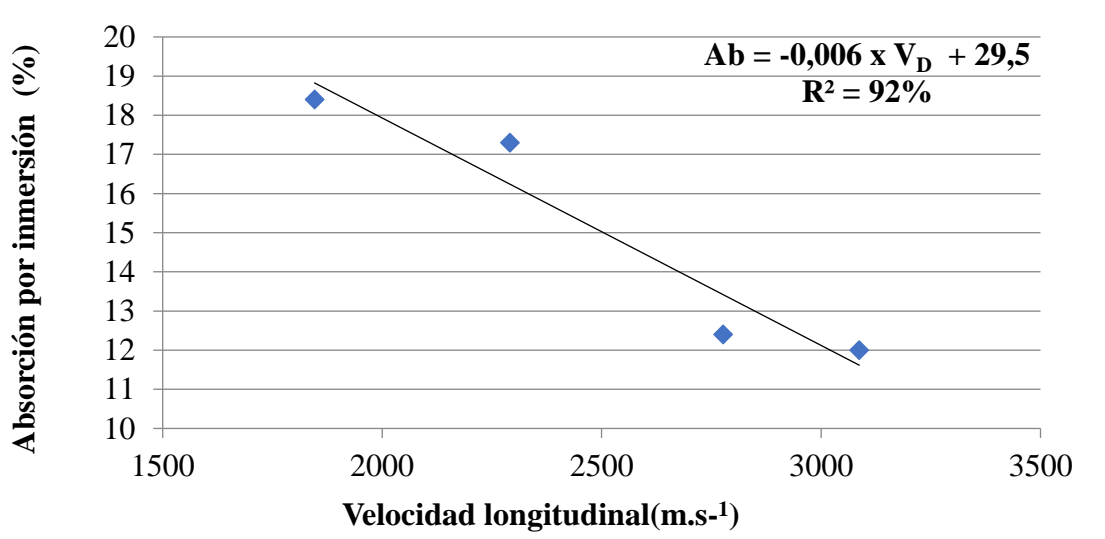


Figura 3. Modelo de regresión entre absorción de inmersión y velocidad longitudinal.

Fuente: Autores (2021).

El polímero se agrega y forma una película sobre la superficie de las partículas de cemento durante el proceso de hidratación, evitando el contacto adicional entre el cemento y el agua, aumentando la porosidad de la matriz de cemento, afectando así la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de los hormigones con aditivo. (Liu et al., 2020).

La presente investigación corrobora los datos encontrados en la literatura, los valores presentados en la Tabla 3, demuestran que hubo una reducción del 26% para los valores medios de f_c y del 13% para los valores medios de E_{ci} , luego de un aumento de la absorción en 18 % para las muestras de concreto con adición de 60 % de polímero sintético, en relación a las muestras sin adición, como se especifica (Tabla 5).

Los modelos obtenidos pueden ser utilizados como solución de ensayos no destructivos para estimar propiedades mecánicas y físicas, como la absorción de agua, en muestras y estructuras de muro pantalla, verificando la infiltración de aguas subterráneas desde la masa de suelo después de la realización de los paneles, hecho que puede comprometer la capacidad del concreto para recibir esfuerzos.

4. CONCLUSIONES

El aumento de las concentraciones de polímero sintético utilizado en las diferentes mezclas de hormigón aumentó su trabajabilidad, reduciendo su densidad y sus propiedades mecánicas (f_c y E_{ci}) y acústicas del material (V_D , V_I y CLL).

Los modelos de predicción de propiedades mecánicas mediante velocidades de ultrasonido

resultaron estadísticamente significativos, presentando coeficientes de determinación superiores al 80% y errores inferiores a los encontrados en la literatura.

De esta forma, se demuestra la sensibilidad de la propagación directa o indirecta de ondas ultrasónicas, cuando se aplican a concretos con propiedades físicas y mecánicas similares a las utilizadas en esta investigación, y las correlaciones aquí establecidas en muestras de concreto pueden ser utilizadas para ayudar a la detección de manifestaciones patológicas in loco.

Además, se observa que el aumento del contenido de polímeros sintéticos en la fabricación del hormigón interfiere directamente en la cantidad de absorción de agua y, en consecuencia, en las propiedades acústicas del material.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de São Paulo por financiar los diversos proyectos del grupo de investigación, lo que hizo posible las instalaciones y la infraestructura utilizadas en esta investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. 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. 2006.

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 (2009). *NBR NM 52: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR NM 67: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). *NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro.

Araújo, C. M. M, May, C. A. (2019). *Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica*. Monografía de projeto final em engenharia civil; Brasília; p. 124.

Bungey J., Millard, S. (2006). *Testing of concrete in structures*. 3 ed. London: Blackie Academic e Professional.

- Djelal, C., Vanhove, Y., Azzi, A., Madec, O. (2020). *Recommendation for concrete mix design to prevent bleed channels on diaphragm walls*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, p.1-13.
- Giacon Jr, M., Goncalves, R., Soriano, J., Amalfi, G. (2010). *Caracterização do concreto utilizando ultrassom*. In: XXVIII CONAENDI - Congresso de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, Santos - SP. Anais CONAENDI 2010. v. 1. p. 1-9.
- Godinho, J. P., Junior, T. F. S; Medeiros, M. H. F; Silva, M. S. A. (2020). *Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete*: 13. ed. Curitiba: Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.
- Hachich, W. et al. (2019). *Fundações: Teoria e Prática*. 2ª ed. São Paulo, Pini.
- Liu, B., Shi, J., Sun, M., He, Z., Xu, H., Tan, J. (2020). Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent. *Journal of Building Engineering*, v. 31, p. 101337. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101337>.
- Matiko, N. N. S. (2000). *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. FAPESP.
- Mohammed, T. U., Rahman, M. N. (2016). *Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete*. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 832-841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>.
- Savaliya, K. D., Thaker, K. K., Dave, U. V. (2014). *Comparison between Different Methods of Ultrasonic Pulse Velocity Tests on Concrete*. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, (March), p. 41–44.
- Silva, R. R. C. (2020). *Propagação de ondas de ultrassom em sistemas de contenção par obras de terra*. Tese de Doutorado. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. p.113.
- Silva, R. R. C., Gonçalves, R., Bertoldo, C. P. (2020). *Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests*. *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120010>.
- Hirde, S. K., Dudhal, Omprakash S. (2016). *Review on polymer modified concrete and its application to concrete structures*. *International Journal of Engineering Research*, ISSN, v. 3. P.766-769. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i3/053>.

Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas

R. Cattelan^{1*}, L. Cielo¹, A. Lübeck¹, A. B. S. Santos Neto¹

*Autor de Contacto: rogerio@ufsm.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

Recepción: 11/11/2021 | Aceptación: 26/02/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

En este estudio se evaluó la influencia de las variaciones de excentricidad de los cables en modelos con losas planas postensadas. El correcto posicionamiento de los tendones en el montaje de losas planas postensadas es fundamental para que el sistema estructural logre un adecuado rendimiento y seguridad. Se analizaron cuatro modelos arquitectónicos diferentes con modificación de la altura de los cables en diferentes puntos y cantidad. Se evaluaron tensiones de pre compresión, tensiones extremas en el tope y base, desplazamientos verticales, balanceo de carga y cantidad de acero pasivo de las losas. Para el análisis se utilizó el software ADAPT Floor Pro. El proyecto sigue las recomendaciones de la NBR 6118:2014 y ACI 318:2019. Para los modelos evaluados, se encontró que la variación en la excentricidad vertical de los tendones en la base de la losa reduce aún más los valores de las tensiones aplicadas, en comparación con la variación en el tope.

Palabras clave: hormigón postensado; postensión no-adherente; excentricidad de los tendones.

Citar como: Cattelan, R., Cielo, L., Santos Lübeck, A., Neto, A. B. S. (2022), "Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 210 – 226, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária Bairro - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900, Brazil.

Contribución de cada autor

Todos los autores contribuyeron igualmente en la concepción y definición del programa experimental del trabajo. El autor Cielo contribuyó con el desarrollo del modelo (100%), análisis y discusión de los resultados (25%) y redacción del trabajo (100%). El autor Lima contribuyó con la orientación del trabajo (50%), análisis y discusión de los resultados (25%) y revisión del manuscrito (34%). El autor Santos Neto contribuyó con la orientación del trabajo (50%), análisis y discusión de los resultados (25%) y revisión del manuscrito (33%). El autor Lübeck contribuyó con el análisis y discusión de los resultados (25%) y revisión del manuscrito (33%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) 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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Analysis of the influence of variation of eccentricity of unbonded tendons on the structural behavior of post-tensioned flat slabs

ABSTRACT

In this study, the influence of cable eccentricity variations in models with prestressed flat slabs was evaluated. The correct positioning of the strands in the assembly of flat slabs in prestressed concrete is essential for the structural system to achieve adequate performance and safety. Four different architectural models were analyzed with modification of the height of the cables at different points and quantity. Pre-compression stresses, extreme stresses on the bottom and top faces, vertical displacements, load balancing and passive reinforcement ratios of the slabs were evaluated. The ADAPT Floor Pro program was used for the analyses, the design being governed by NBR 6118:2014 and recommendations from ACI 318:2019. For the models evaluated, it was found that the variation in the vertical eccentricity of the strands on the lower face of the slab further reduces the values of applied stresses, compared to the variation on the upper face.

Keywords: prestressed concrete, non-adherent prestressing, strands eccentricity.

Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas

RESUMO

Neste estudo, avaliou-se a influência de variações de excentricidade dos cabos em lajes lisas protendidas. O correto posicionamento das cordoalhas na montagem de lajes lisas protendidas é imprescindível para que o sistema estrutural alcance desempenho e segurança adequados. Analisou-se quatro modelos diferentes com modificação da altura dos cabos em diferentes pontos e quantidades. Foram avaliadas tensões de pré-compressão, tensões nas faces inferior e superior, flechas, balanceamentos de cargas e armaduras passivas. Utilizou-se o programa ADAPT Floor Pro para as análises, sendo o dimensionamento regido pela NBR 6118:2014 e recomendações do ACI 318:2019. Constatou-se que a variação na excentricidade vertical das cordoalhas na face inferior da laje, reduzem mais os valores das tensões, em comparação com a variação na face superior.

Palavras-chave: Concreto Protendido, Protensão Não Aderente, Excentricidade de Cordoalhas.

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 uso de postensión con los tendones no-adherentes en construcciones es muy utilizada en países económicamente desarrollados, tales como Estados Unidos y Australia. Se puede también mencionar regiones del Medio Oriente, Sudeste de Asia y Reino Unido, así como algunos países de América del Sur, en razón del excelente rendimiento estructural y de los beneficios económicos (Aalami, 2000; Santos, 2017; Silva et al., 2018).

La implementación de este sistema de postensión solo fue incluida en la norma del *American Concrete Institute* (ACI) 318 en 1963, después de la realización de diversas obras por el mundo (Aalami, 2000; Kang and Bondy, 2008). En Brasil, el uso de losas planas con postensión no-adherente se inició solo en el año 1997 (Carvalho, 2017). Proyectos arquitectónicos que proponen grandes espacios, con reducido número de columnas y vigas, principalmente en construcciones y residencias de alto nivel, impulsó el uso de losas con postensión no-adherente en el país (Santos, 2017; Almeida, 2001; Loureiro, 2006). Se puede también citar el desarrollo de acero de alta resistencia, juntamente con la evolución de *softwares* de calibración, además de la practicidad de ejecución del sistema, como factores decisivos para el avance en la aplicación efectiva de la postensión en la construcción civil (Carvalho, 2017; Loureiro, 2006).

Además del beneficio financiero, la postensión trae mejorías en el desempeño en el Estado Límite de Servicio (ELS) y en la seguridad de las estructuras de hormigón, con énfasis para la durabilidad, pues la ausencia o reducción de las grietas garantiza una protección más grande de las armaduras, inhibiendo el fenómeno de la corrosión (NBR 6118, 2014; Cholfe y Bonilha, 2018; Silva, 2003).

En las losas planas con postensión no-adherente, los tendones son, en la mayoría de las veces, con dibujos en formato parabólico, resultando en excentricidades con relación al centro de la losa, que permiten aumentar la eficiencia de las fuerzas aplicadas por los cables, aumentando también la capacidad de balanceo de las cargas (Pfeil, 1984; Vicente y Albino, 1994). El concepto de carga balanceada tiene como principio básico propiciar que las cargas verticales equivalentes de la postensión mantengan en balanceo una fracción de las cargas permanentes actuantes, quedando la estructura, para ese nivel de cargamento, sometida solo a tensiones de compresión (Silveira, 2002; Aalami, 1990; Aalami y Bommer, 1999).

Este factor apunta la necesidad de que el montaje de los tendones sea el más próximo posible de las posiciones verticales indicadas en el proyecto, pues un posicionamiento vertical incorrecto puede ocasionar el surgimiento de manifestaciones patológicas, flechas distintas de las previstas en el proyecto o mismo, en situaciones más extremas, el colapso de la estructura (Silva et al., 2018; Aalami y Bommer, 1999; Romanichen y Souza, 2019).

Para mantener los tendones en la posición vertical definida en proyecto, se utiliza separadores de apoyo puntuales. Estos separadores, cuando industrializados, vienen en modelos plásticos o de acero, con riguroso control en el proceso de producción de la altura. Sin embargo, excepcionalmente, se hace la producción de estos separadores en obra, con el pliegue de barras de acero, no presentando, en la mayoría de las veces, el adecuado control de la producción y, en consecuencia, una variabilidad en sus alturas (Loureiro, 2006; Aalami, 2014). Además de eso, otras situaciones, como la falta de atención en el manejo con la armadura, junto con los daños causados en las operaciones de hormigonado, pueden causar el rompimiento o desplazamiento de estos separadores (Figura 1).

Todavía, aunque haya el control y el cuidado con relación a los aspectos apuntados anteriormente, hay también el error humano en el posicionamiento de estos separadores durante la etapa del montaje de los tendones. Tales circunstancias pueden producir un posicionamiento vertical de los tendones, con una altura y excentricidad distintas del valor especificado por el proyectista.

Los problemas provenientes del mal posicionamiento de los tendones pueden estar relacionados con el surgimiento de situaciones como fisura de la losa, desplazamientos verticales excesivos, tensiones actuantes distintas de las calculadas en proyecto, superando los límites de tracción o

compresión del hormigón en el elemento estructural. Aún se puede mencionar desplazamiento del hormigón en función de menores cubrimientos y la aceleración en el proceso de corrosión del acero a causa de falta de cubrimiento (Souza, 2018; Xin y Xianyan, 2012).



Figura 1. Operación de hormigonado: (a) Manejo de la mano de obra en contacto con la armadura. (b) Separador dañado y mal posicionado.

El principal factor influyente para el desempeño del sistema es el respecto por el correcto posicionamiento vertical de los cables especificado en el proyecto durante la etapa de montaje (Carvalho, 2017; Souza Junior y Oliveira, 2016; Caro et al., 2013).

Cauduro (2002) recomienda que desvíos verticales en la posición de los tendones sean toleradas hasta ± 5 mm, en losas que no excedan el espesor de 200 mm y tolerancia máxima de ± 10 mm, en losas con espesor entre 200 mm y 600 mm. Además de eso, el autor también señala que los puntos altos y bajos son las posiciones más críticas y que la posición horizontal de los tendones no es crucial, sin embargo, se debe evitar oscilaciones excesivas. Así, los valores aceptables de desvíos absolutos que independen de la geometría de la estructura y esfuerzos involucrados pueden resultar en inseguridad en la evaluación estructural. Las variaciones de excentricidad de los cables de postensión pueden ser más o menos influyentes, dependiendo del espesor de la losa, o sea, el error relativo de excentricidad, espacio entre apoyos y cargamento aplicado.

En ese estudio se evaluó la influencia de variaciones de excentricidad de los cables en losas planas de postensión. Se desarrolló modelos variando los espesores y espacios de las losas, además del error relativo de excentricidad del cable. El dimensionamiento de las losas planas de hormigón postensados siguió las especificaciones de la ABNT NBR 6118:2014 y algunas recomendaciones del ACI 318:2019.

2. METODOLOGÍA

2.1 2.1 Geometría de las Losas y Trazo de los Cables

Los modelos estructurales probados son compuestos por un piso de losa, apoyada directamente en las columnas, sin la existencia de vigas, como en la Figura 2. Los espacios entre las columnas son iguales en cada modelo y tienen variaciones de 7,0 a 10,0 m, resultando en cuatro modelos estructurales, con espacios de 7,0 m x 7,0 m hasta 10,0 x 10,0 m, variando de metro en metro, y los modelos son nombrados de M7, M8, M9 e M10.

Los modelos estructurales presentan distintos espesores de losas, definidos aproximadamente por la relación $L/42$ (ACI 318, 2019), donde L es el vano de la losa. En la Tabla 1 se presentan los modelos estructurales con sus nomenclaturas, vanos entre columnas y los espesores para cada una de las losas.

El trazo de los cables de postensión siguió la premisa de disponer las fajas de tendones concentradas

en la dimensión más grande de la losa (dirección x) y, tendones distribuidos en la dirección perpendicular (dirección y), Figura 3.

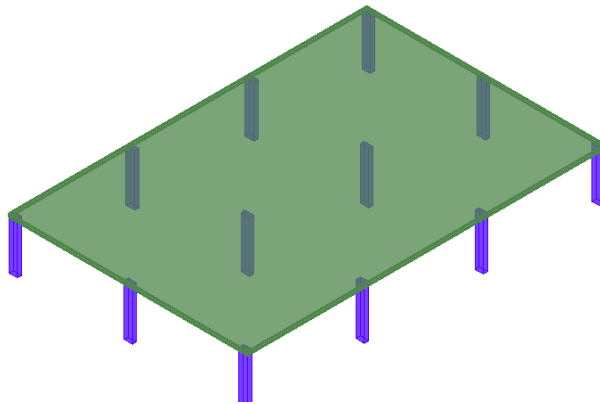


Figura 2. Modelo estructural del piso para los análisis.

Tabla 1. Nomenclatura y dimensiones de los modelos estructurales.

	Nomenclatura	Espacio entre columnas	Espesor de la losa
Modelo	M7	7,0 m x 7,0 m	170 mm
	M8	8,0 m x 8,0 m	190 mm
	M9	9,0 m x 9,0 m	210 mm
	M10	10,0 m x 10,0 m	240 mm

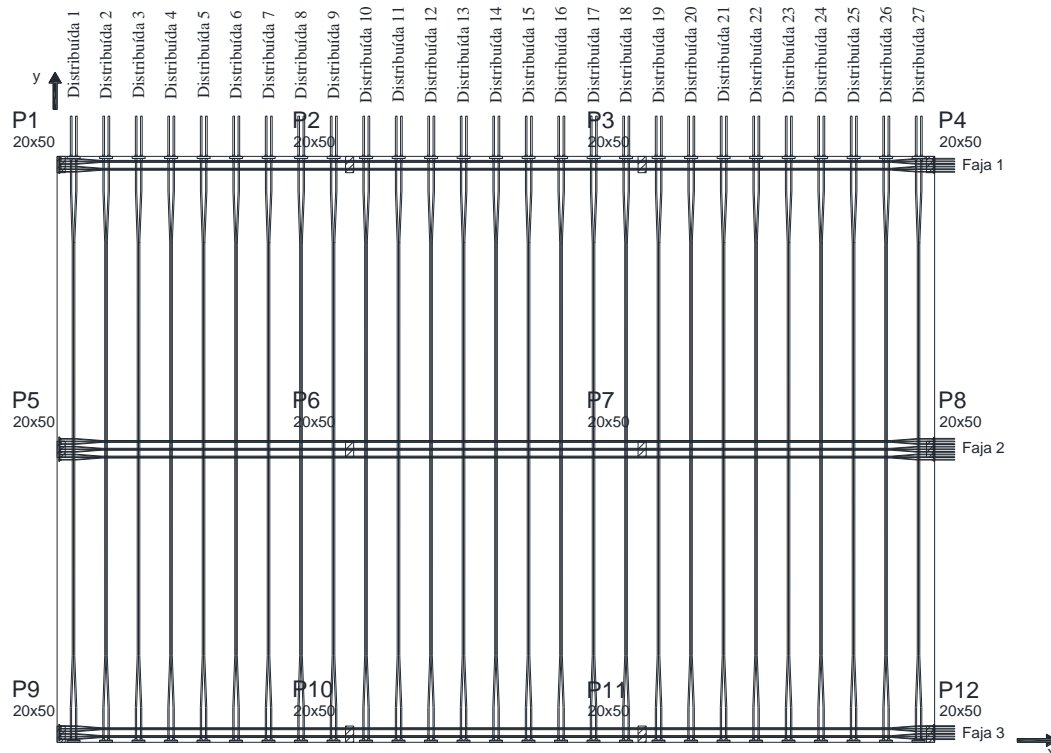


Figura 3. Layout de los tendones no-adherentes en la losa plana postensado.

Se analizó, exclusivamente, la faja central de tendones de la dirección x, pues en esta faja se concentran los cargamentos más grandes y, así, es más influenciada por las variaciones de excentricidad aplicadas en cada modelo propuesto.

Las variaciones de las excentricidades fueron probadas sobre las columnas (cumbre) y en el centro de los espacios (base), de manera aislada y también conjunta, según el esquema de la Figura 4. En el primer caso fueron reducidas las excentricidades de los tendones solamente en la parte superior de la losa (cumbre), en las regiones de las columnas P6 y P7. Después, se disminuyó la excentricidad en las regiones entre los apoyos, en la parte inferior de la losa (base). En el tercer caso, se realizó el análisis con variaciones en conjunto, denominada como combinación crítica, reduciendo las excentricidades de los tendones simultáneamente en las regiones entre los apoyos y también en el tope de las columnas P6 y P7.

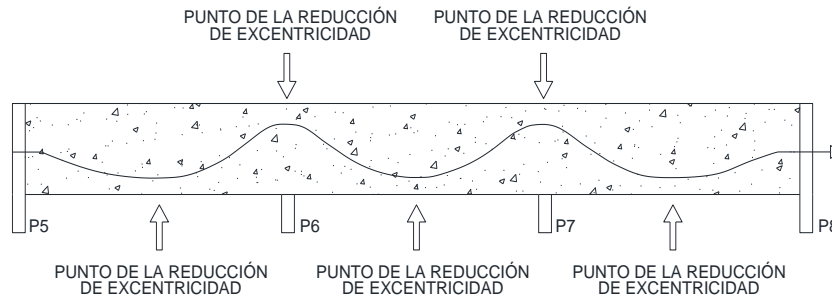


Figura 4. Puntos de reducción de la excentricidad para las losas.

Para cada uno de los cuatro modelos (Tabla 1) se desarrolló cuatro hipótesis de variaciones de excentricidades, con valores de 5 mm, 10 mm, 15 mm y 20 mm. Se adoptó estos valores en el estudio a causa de que, generalmente, en los proyectos, los puntos de apoyo verticales son presentados en ese formato, visando viabilizar la conferencia *in loco*. Además, los estudios presentados en (Cauduro, 2002) demuestran valores límites de 5 mm y 10 mm de reducción en las excentricidades de los tendones de las losas, para espesores de losas iguales o más grandes que las definidas en este estudio. En la Tabla 2 se presentan las hipótesis de variaciones, con sus nomenclaturas y las respectivas reducciones de las excentricidades.

Tabla 2. Hipótesis de las variaciones de excentricidades.

Hipótesis	Nomenclatura	Reducción de excentricidad (mm)
Referencia	H0	0
Hipótesis 1	H5	5
Hipótesis 2	H10	10
Hipótesis 3	H15	15
Hipótesis 4	H20	20

El espacio entre el P5 y el P6 se lo nombró “primero” en los análisis, el espacio entre el P6 y el P7 recibió la denominación “central” y, por fin, el espacio entre el P7 y el P8 recibió la denominación de “último”, según el esquema de la Figura 5.

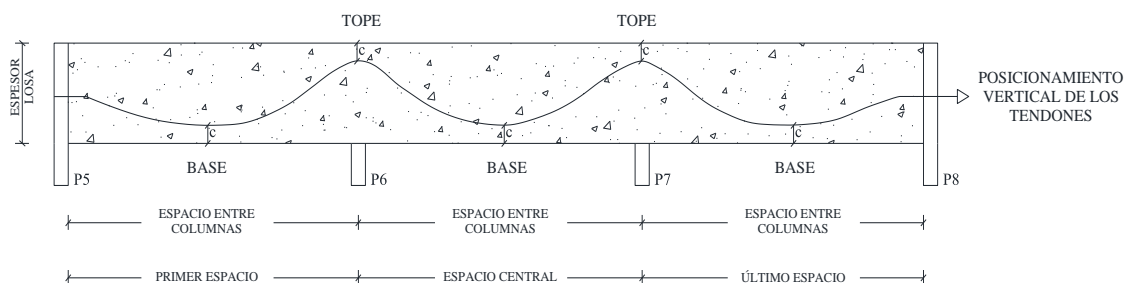


Figura 5. Posicionamiento vertical de los tendones en la losa.

2.2 Materiales y Parámetros Normativos

Se consideró un cargamento variable (sobrecarga) con el valor mínimo recomendado en la (NBR 6120, 2019) para espacios de uso general de edificaciones comerciales, igual a 2,5 kN/m². Se adoptó también un cargamento permanente de revestimiento de valor igual a 1,0 kN/m². Además de estos dos cargamentos, se aplicó el peso mismo calculado en función del espesor de la losa, en cada situación.

Se adoptó el valor de 2,5 cm para cubrir las armaduras pasivas y 3,0 cm para cubrir las armaduras activas. En los modelados se adoptó hormigón clase C35, con f_{ck} de 35,0 MPa y módulo de elasticidad (E) de 39,7 GPa.

Se utilizó tendones del tipo CP 190 RB ($f_{ptk} = 1900$ MPa), con diámetro nominal de 12,7 mm y área de acero nominal 100,9 mm².

En los análisis de los modelos de losas se siguió inicialmente tres parámetros fundamentales normalizados: tensión de precompresión mínima, tensión nominal límite de tracción y desplazamientos verticales máximos. Después que los criterios fueron logrados, se adaptó las demás consideraciones, como el balanceo de cargas y desplazamientos finales. Después de la realización de estos primeros análisis, se dimensionó las losas para en Estado-Límite de Servicio (ELS) y Estado- Límite Último (ELU).

La tensión de precompresión, en cualquier punto de la losa, respetó el valor mínimo de 1,0 MPa, (ACI 318, 2019; NBR 6118, 2014). En los modelos, en el proceso de predimensionamiento, donde la precompresión de 1,0 MPa no fue suficiente para atender el límite de la máxima tensión normal de tracción en el hormigón o desplazamientos, se aumentó la calidad de tendones hasta que se alcanzó este parámetro.

Para el parámetro de balanceo de cargas, resultados entre 60% a 80% de la carga permanente, estos valores son usuales para losas de construcciones residenciales, comerciales y garajes, (Loureiro, 2006).

Para el dimensionamiento se definió la utilización de la postensión limitada, (NBR 6118, 2014). Según la norma, en los proyectos con losa plana postensada, es suficiente que se atienda el ELS-F (Estado Límite de Servicio de Formación de Fisuras), para la frecuente combinación de las acciones, en cualquier de las clases de agresividad ambiental. El valor límite de tensión normal de compresión en el hormigón en el acto de la postensión fue limitado en 15,75 MPa y en el estado límite de formación de fisuras 21,0 MPa, (ACI 318, 2019).

La norma (NBR 6118, 2014) limita los desplazamientos verticales, para la aceptabilidad sensorial de columnas y losas, en la relación $L/250$ (teniendo en cuenta que L es el espacio libre entre columnas). Se tomó este valor como límite para los modelos antes de la inserción de variaciones en las excentricidades de los tendones.

Las armaduras pasivas positivas y negativas fueron calculadas para los distintos modelos, según los criterios presentados en (NBR 6118, 2014). La Tabla 3 resume los parámetros utilizados en la verificación de las losas.

Después de la inserción de las variaciones de excentricidad, se hizo los análisis para confirmar cuales modelos se mantuvieron atendiendo a los límites y, de esa manera, calcular las armaduras pasivas y definir la posición y el valor máximo de variación aceptable de la excentricidad de los tendones.

2.3 Análisis de Dimensionamiento

Se realizó el dimensionamiento de las losas con la ayuda del programa Adapt Floor 2017 PRO. Este programa es específico para el análisis y dimensionamiento de hormigón postensado y discretiza la losa en elementos finitos de placa, verificando los efectos de la postensión según la geometría y fuerza de los tendones, en cada elemento.

El programa permite la generación automática de la malla de elementos finitos, y compete al usuario definir el tamaño de los elementos de esta malla. En este trabajo se testó dos tamaños de

dimensión máxima de los elementos. Como no se encontró diferencias significativas en los resultados, se definió la utilización de una dimensión máxima para los elementos de 500 mm de malla para los análisis. La Figura 6 muestra la malla de elementos finitos para el Modelo M8.

Tabla 3. Criterios analizados con los límites y respectivas fuentes indicadas.

Criterio analizado	Límite	Parámetro	Unidad	Fuente
Tensión de precompresión	Mínimo	1,0	MPa	NBR 6118, 2014 e ACI 318, 2019
Tensión de tracción en las faces inferior y superior	Máximo	3,38	MPa	NBR 6118, 2014
Tensión de compresión máxima para el Acto de la Postensión	Máximo	15,0	MPa	ACI 318, 2019
Tensión de compresión máxima para el ELS-F	Máximo	21,0	MPa	ACI 318, 2019
Balaceo de cargas	Recomendación	60 a 80	%	Loureiro, 2006 e Hanai, 2005
Desplazamientos verticales diferidos	Máximo	L/250	-	NBR 6118, 2014

Para el análisis de los modelos de las losas se lanzó líneas de soporte en el alineamiento de las columnas. Esas líneas permiten al programa definir “*design sections*”, donde son presentados al usuario los valores medios de las tensiones en la losa. Así, las tensiones son analizadas a partir de las regiones tributarias que compilan los resultados de las áreas definidas por las líneas de soporte. La cantidad de tendones para la faja dimensionada, para los Modelos M7, M8, M9 e M10 fueron 10, 17, 25 y 33 unidades, respectivamente.

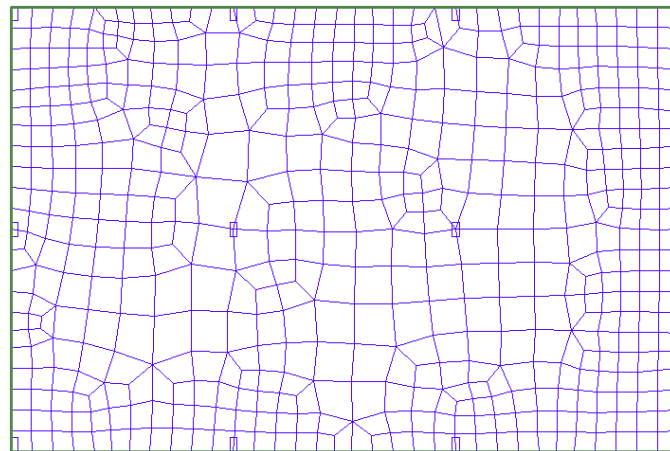


Figura 6. Malla de elementos finitos de la losa.

En la Figura 7 se presentan las tensiones normales en la dirección “x” para las faces superior e inferior de la losa, para la combinación frecuente, del Modelo M8.

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Tensiones de precompresión

La Tabla 4 presenta los resultados para los valores de las tensiones normales de precompresión en el análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas

las losas. Las tensiones normales de precompresión no varían en función de la modificación de la posición vertical de los tendones y sí en virtud de la cantidad de tendones y de la intensidad de la fuerza aplicada por ellos. Una mayor densidad de tendones, necesaria para equilibrar los modelos con espacios mayores, resultó en valores mayores de tensión de precompresión. Para el modelo M7, las tensiones variaron entre 1,0 y 1,11 MPa, entre espacios. Mientras que para el modelo M10 variaron entre 1,43 y 1,60 MPa, entre espacios.

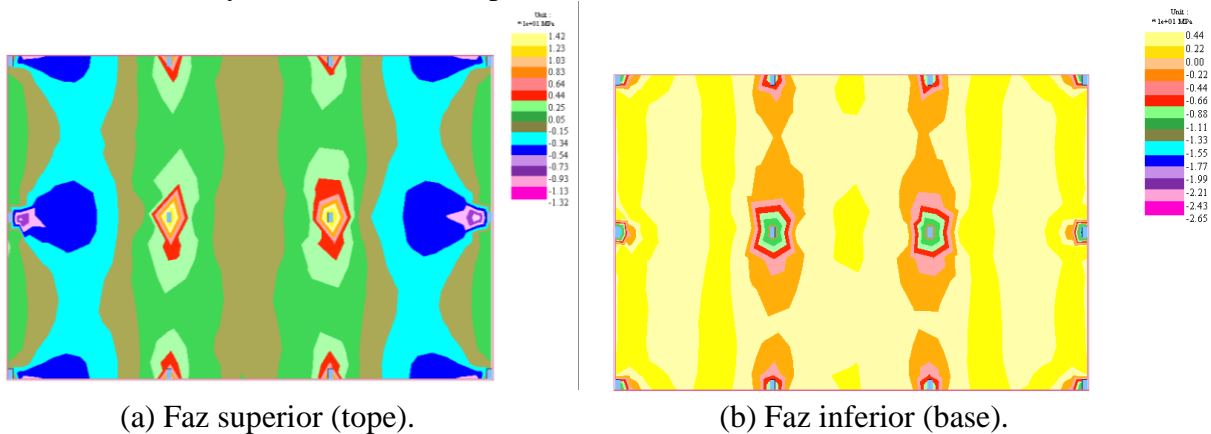


Figura 7. Tensiones normales (dirección x), para combinación frecuentes, de la losa modelo M8, en MPa.

Tabla 4. Verificación de las tensiones de precompresión en las losas (valores en MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Central	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	Último	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Modelo		M8												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
	Central	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
	Último	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Modelo		M9												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
	Central	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
	Último	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Modelo		M10												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
	Central	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	Último	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

3.2 Tensiones normales máximas en las losas

Las tensiones normales de tracción en la faz inferior de la losa (Tabla 5), para los cuatro modelos, incluso con los cambios en el posicionamiento vertical de las excentricidades de los tendones, recibieron el valor límite máximo de 3,38 MPa en el ELS-F, conforme establecido en la (NBR

Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas

6118, 2014).

En los modelos de referencia, en la sección del espacio central, se encontraron tensiones de compresión en la faz inferior de la losa, debido a una mayor fuerza de postensado en esta sección con respecto al primer y último espacio.

Al modificar las excentricidades de los tendones, exclusivamente en el tope de las columnas, los esfuerzos sufren menores variaciones en comparación con las reducciones de tensiones provocadas en los modelos con variaciones de excentricidades en la base. Las reducciones de las excentricidades en la combinación crítica son más desfavorables. Aun así, en todas las hipótesis las tensiones normales de tracción en la faz inferior de la losa permanecieron dentro del límite de 3,38 MPa (NBR 6118, 2014). Los análisis de las tensiones en la faz superior están resumidos en la Tabla 6. Se destacaron en amarillo las tensiones que excedieron el límite normativo. La variación de la excentricidad en el tope de las columnas, en la hipótesis H5, fueron las únicas que presentaron resultados normales de tensión de tracción en la faz superior, atendiendo al límite normativo de 3,38 MPa, (NBR 6118, 2014). La reducción de excentricidad en la faz inferior de la losa genera mayores tensiones normales de tracción en la faz superior del elemento, en la región de apoyo (columnas), en comparación con la variación de excentricidad en la faz superior. Los modelos M7 y M9 fueron los únicos que, en la hipótesis H5 de modificación de los valores de excentricidad del caso “Base”, tuvieron sus valores de tensión normal de tracción inferiores a 3,38 MPa.

Tabla 5. Verificación de análisis de las tensiones normales en la faz inferior en las losas (valores en MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	2,37	2,39	2,42	2,45	2,47	2,45	2,54	2,63	2,72	2,48	2,60	2,71	2,83
	Central	-0,15	-0,12	0,00	0,05	0,12	-0,10	0,00	0,02	0,05	-0,03	0,09	0,22	0,36
	Último	2,52	2,55	2,58	2,60	2,63	2,61	2,69	2,78	2,86	2,63	2,75	2,86	2,97
Modelo		M8												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	2,52	2,55	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-0,62	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	-0,2	0,01
	Último	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	2,58	2,69	2,79	2,9	2,62	2,75	2,89	3,03
Modelo		M9												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	2,64	2,65	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-1,49	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,3	-1,2	-1,1	-1	-1,2	-1	-0,8	-0,6
	Último	2,63	2,66	2,72	2,74	2,78	2,67	2,79	2,9	3,01	2,71	2,82	3,01	3,16
Modelo		M10												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	Primero	2,70	2,73	2,77	2,80	2,83	2,81	2,91	3,01	3,12	2,84	2,97	3,10	3,24
	Central	-1,41	-1,33	-1,24	-1,15	-1,07	-1,34	-1,27	-1,20	-1,13	-1,26	-1,10	-0,93	-0,77
	Último	2,69	2,73	2,76	2,79	2,82	2,80	2,90	3,01	3,11	2,83	2,97	3,10	3,24

Tabla 6. Verificación del análisis de las tensiones superior en las losas (valores en MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	P5	3,04	3,12	3,21	3,29	3,37	3,15	3,25	3,36	3,46	3,23	3,42	3,61	3,80
	P6	3,26	3,33	3,41	3,48	3,56	3,36	3,45	3,55	3,65	3,43	3,61	3,78	3,96
Modelo		M8												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	P5	3,28	3,38	3,47	3,56	3,65	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,14
	P6	3,08	3,18	3,28	3,37	3,47	3,21	3,33	3,46	3,58	3,30	3,53	3,75	3,97
Modelo		M9												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	P5	3,09	3,19	3,29	3,40	3,51	3,24	3,34	3,42	3,55	3,26	3,49	3,72	3,95
	P6	3,13	3,22	3,31	3,45	3,53	3,29	3,42	3,56	3,57	3,39	3,64	3,88	4,12
Modelo		M10												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Espacio entre columnas	P5	3,28	3,37	3,47	3,56	3,66	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,15
	P6	3,23	3,32	3,42	3,52	3,65	3,33	3,47	3,65	3,77	3,45	3,67	3,88	4,11

Además, en la combinación crítica, en ninguna de las variaciones de excentricidad, las tensiones normales de tracción obtenidas fueron menores al límite normativo establecido de 3,38 MPa, para el ELS en la combinación frecuente, (NBR 6118, 2014).

3.3 Desplazamientos verticales

En la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos para los desplazamientos verticales diferidos de las losas.

Los modelos M7 y M8 presentaron, para todas las hipótesis y casos de variaciones, valores de desplazamientos verticales con límites de 28,0 mm y 32,0 mm, respectivamente. El modelo M9, solo en el espacio central, obtuvo valores menores a 36,0 mm de desplazamientos verticales. Finalmente, el modelo M10 tuvo sus valores de desplazamiento vertical por debajo de 40,0 mm, límite normativo (NBR 6118, 2014), en todas las variaciones de excentricidades para el caso “Tope” de modificaciones en las alturas de los tendones.

Tabla 7. Análisis de los desplazamientos verticales en las losas (valores en mm).

Modelo		M7												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Espacio entre columnas	Primer o	18,5	18,8	19,0	19,2	19,4	19,1	19,6	20,1	20,7	19,3	20,0	20,8	21,5
	Central	5,4	5,8	6,3	6,6	7,0	5,7	6,0	6,3	6,6	6,1	6,9	7,5	8,2
	Último	19,1	19,3	19,4	19,6	19,8	19,6	20,1	20,6	21,1	19,8	20,4	21,1	21,8
Modelo		M8												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Espacio entre columnas	Primer o	24,2	24,4	24,7	24,9	25,2	24,9	25,6	26,3	27,0	25,1	26,1	27,2	28,0
	Central	4,8	5,1	5,5	6,5	7,1	5,3	5,6	6,1	7,1	5,8	6,7	7,7	8,7
	Último	23,9	24,2	24,6	24,8	25,1	24,7	25,5	26,3	30,0	25,0	26,1	27,1	28,1
Modelo		M9												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Espacio entre columnas	Primer o	35,7	35,9	36,5	36,8	37,1	36,1	36,7	37,0	37,9	36,3	36,8	37,9	39,2
	Central	5,0	5,8	6,6	7,4	8,1	6,5	7,1	7,6	8,3	7,3	8,4	9,7	10,9
	Último	35,6	35,9	36,2	36,7	37,0	36,0	36,3	36,8	37,6	36,1	36,5	37,7	39,0
Modelo		M10												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Espacio entre columnas	Primer o	35,4	35,7	36,4	38,0	39,0	36,3	37,2	38,1	40,1	36,9	39,3	41,6	42,5
	Central	2,7	3,3	5,0	8,9	10,1	3,3	5,9	9,0	10,3	4,0	6,6	9,9	12,0
	Último	34,8	35,2	35,9	37,4	38,3	35,8	36,7	37,6	39,6	36,1	38,9	40,0	42,1

Para mejor comprensión de los efectos de la alteración de la excentricidad de los cables en el comportamiento a flexión de la losa, se desarrolló el gráfico de la Figura 8. En este gráfico en el eje de ordenadas, la relación f/L representa, en forma de denominador de fracción, la flecha equivalente, por ejemplo $L/430$, donde el valor $L/250$ es la flecha límite. En el eje de abscisas se sitúan las excentricidades relativas, o sea, el valor del desplazamiento dado al cable (excentricidad), en relación al espesor de la losa. La excentricidad relativa (o variación de excentricidad relativa) puede ser más o menos influyente para diferentes casos. Observando la alineación de los puntos,

puede verse que para todos los modelos de losa la hipótesis crítica conduce a mayores variaciones en los desplazamientos. Se han insertado líneas discontinuas para demostrar los casos probados, M7 a M10.

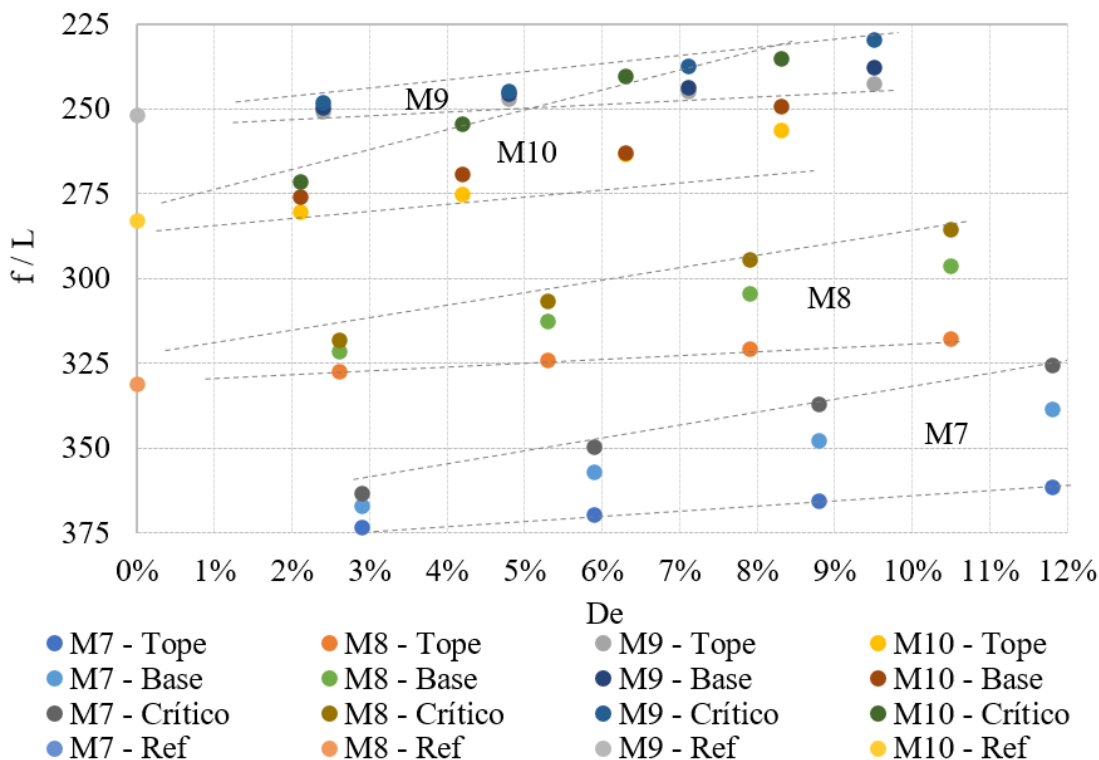


Figura 8. Desplazamientos relativos para los diferentes modelos de losas.

Para los casos M9 y M10, la posición de la excentricidad, superior, inferior o crítica, fue menos influyente que para los casos M7 y M8. La amplitud de variación de las flechas aumentó cuando se acrecentó la excentricidad relativa. Para el caso M9 –crítico, el aumento de la excentricidad relativa de 2,4 % a 9,5 % resultó en un aumento de la flecha de $L/248$ a $L/230$. Para el caso M7 –crítico, un aumento en la excentricidad relativa de 2,9% a 11,8% resultó en un aumento de la flecha de $L/363$ a $L/325$.

3.4 Balanceo de cargas

Los valores del balanceo de cargas aumentan a partir de la inserción de tendones impuestas para cumplir con los límites de tensiones normales de tracción en las faces inferior, superior y de precompresión de la losa. La Tabla 8 muestra el resumen de los valores del balanceo de carga para todos los conjuntos evaluados.

Solamente el modelo M7 cumplió con las recomendaciones de (Loureiro, 2006; Aalami, 2014), para valores de balanceo de cargas, entre 60% y 80%. En los demás modelos, el balanceo varió entre el 59 y el 95% de las cargas permanentes.

Tabla 8. Análisis del balanceo de cargas para las losas (valores en %).

Modelo		M7												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Espacio entre columnas	Primero	73	73	72	72	71	73	72	72	71	72	71	70	69
	Central	74	72	71	69	68	72	71	69	68	71	68	64	61
	Último	80	79	79	78	77	79	78	77	75	78	76	74	72
Modelo		M8												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Espacio entre columnas	Primero	82	81	80	79	78	81	80	78	77	80	78	75	73
	Central	92	89	87	84	82	89	87	84	82	87	82	77	72
	Último	87	87	86	85	84	86	84	83	81	85	82	80	78
Modelo		M9												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Espacio entre columnas	Primero	88	87	86	85	83	60	59	57	56	60	57	54	52
	Central	94	92	90	88	85	61	60	58	57	60	56	53	50
	Último	87	86	85	84	83	59	58	57	56	58	56	54	52
Modelo		M10												
Caso		Referencia	Tope				Base				Crítico			
Hipótesis			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Espacio entre columnas	Primero	97	96	95	94	93	95	93	91	89	94	91	88	85
	Central	93	92	90	88	86	92	90	88	86	90	86	83	79
	Último	88	87	87	86	85	87	95	83	81	86	83	80	77

3.5 Armaduras pasivas

En la Tabla 9 se presentan los resultados del cálculo de las armaduras pasivas positivas.

Tabla 9. Resultado armadura positiva de las losas

Modelo de análisis	Hipótesis e casos de cálculo					
	Referencia		H5 - Tope		H5 - Base	
	Espacio primero e último	Espacio central	Espacio primero e último	Espacio central	Espacio primero e último	Espacio central
	Área de acero (cm ² /m)		Área de acero (cm ² /m)		Área de acero (cm ² /m)	
M7	2,54	2,11	2,54	2,11	2,64	2,22
M8	2,72	2,10	2,72	2,10		
M9	3,26	2,40	3,26	2,40		
M10	3,74	2,46	3,74	2,46		

Para las variaciones en las hipótesis H5 en el caso “Tope”, las tasas de armaduras pasivas positivas

se mantuvieron iguales a sus respectivos modelos de referencia. Los cambios en la tasa de armaduras ocurrieron en los mismos modelos, pero en diferentes tramos. La Tabla 10 muestra los cálculos de las armaduras para combatir la flexión negativa en el caso H5.

Tabla 10. Armadura negativa de las losas.

Modelo de análisis	Hipótesis y casos de cálculo		
	Referencia	H5 - Tope	H5 - Base
	Área de acero (cm ² /m)		
M7	7,4	7,4	7,7
M8	10,5	10,5	
M9	12,2	12,2	
M10	15,6	15,6	

La tasa de armadura pasiva, para combatir la flexión negativa, se mantuvo igual para los modelos de hipótesis de referencia en comparación con los modelos en la hipótesis H5 de variación de excentricidad para el caso "Tope". Esto porque la reducción de 5 mm en la altura de las excentricidades de los tendones, colocadas encima de las columnas, no presentó suficientes nuevos esfuerzos para aumentar la cantidad de acero en este caso.

La variación de la excentricidad de los tendones en la faz inferior para el modelo M7 obligó a aumentar la tasa de refuerzo para combatir la flexión negativa de las columnas, en relación al modelo de referencia, para la misma distancia entre columnas analizada.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el análisis y diseño de cuatro modelos de losas planas postensadas, con variación de espacios y excentricidades de los tendones, con el fin de simular posibles errores de montaje en el posicionamiento de los espaciadores de apoyo vertical. En los diferentes modelos se analizaron los esfuerzos de precompresión, tensiones normales en las faces inferior y superior de la losa, balanceo de carga y desplazamientos verticales. También se dimensionaron las armaduras pasivas positivas y negativas.

Por medio del análisis de los resultados, es posible concluir que la reducción en las excentricidades de los tendones interfirió directamente en las tensiones de las losas planas postensadas, provocando principalmente reducciones en la porción de tensiones normales combatidos por el postensado. La disminución de la excentricidad de los tendones en la faz inferior de la losa interfiere negativamente en mayor medida que la variación de la excentricidad en la faz superior, afectando el control de las tensiones normales en la losa, así como en los criterios de balanceo de cargas y desplazamientos.

El modelo M7 fue el único que obtuvo valores para los criterios analizados, cumpliendo con los límites normativos, con variaciones de las excentricidades en la hipótesis H5, para los casos "Tope" y "Base", con la posición de la variación de las alturas de los tendones.

Por otro lado, los Modelos M8, M9 y M10, solo en la variación para la hipótesis H5, en el caso "Tope", presentaron resultados de tensiones normales de tracción por debajo del límite de 3,38 MPa, establecido por la norma (NBR 6118, 2014).

El factor responsable de las tensiones de precompresión en el elemento estructural fue únicamente la cantidad de tendones y el esfuerzo aplicado sobre los mismos, sin sufrir reducciones en los valores por la modificación vertical del posicionamiento.

Los desplazamientos verticales en las losas sufrieron cambios con la aplicación de variaciones en las excentricidades. Los modelos M7 y M8 fueron los únicos que se mantuvieron por debajo de los límites normativos de L/250 para todas las hipótesis de variaciones de excentricidades aplicadas.

El criterio de balanceo de carga siguió cumpliendo con los límites recomendados solo en el modelo

M7. Al ser criterios complementarios, no estandarizados, pueden aceptarse en el diseño, incluso con valores no recomendados.

Las tasas de armadura pasiva positiva y negativa se mantuvieron iguales, solo en los modelos de referencia y en la hipótesis H5 de variación de la excentricidad del caso “Tope”.

La máxima variación relativa de la excentricidad para que los criterios analizados sigan cumpliendo los límites establecidos es de 2,1% al comparar la variación de la excentricidad con el espesor de la losa, en el caso “Tope”, para cumplir el criterio.










En el análisis se puede afirmar que es admisible, para losas planas postensadas con postensado no adherente, del tipo CP 190 RB ϕ 12,7 mm, con espacios entre columnas de 7,0 m a 10,0 m, una tolerancia máxima de 5mm de reducción en el posicionamiento vertical de los cables en la faz superior. Este análisis es más limitado cuando se compara con las tolerancias encontradas en la literatura.

5. REFERENCIAS

- Aalami, B. O. (1990), *Load Balancing: A Comprehensive Solution to Post - Tensioning*. ACI Structural Journal: 662-670.
- Aalami, B. O. (2014), *“Post-Tensioned Manual”*. California: ADAPT, v.1, p. 500.
- Aalami, B. O. (2000), *Structural Modeling of Post-Tensioned Members*. Journal of Structural Engineering. Vol. 126 N° 2: 157-162.
- Aalami, B. O., Bommer, A. (1999), *“Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors”*. Post-Tensioning Institute (PTI), Farmington Hills, USA.
- Almeida, S. R. M. (2001), *“Contribuição ao projeto ótimo de cabos em vigas de concreto protendido”*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.2058>.
- American Concrete Institute (2019). *ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, MI.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Caro, L. A., Vargas J. R. M., Ros, P. S. (2013), *Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens*. Engineering Structures. Vol. 48, p. 704-715. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.038>.
- Carvalho, R. C. (2017), *“Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento”*. Ed. Pini. São Paulo, Brasil, p. 448.
- Cauduro, E. L. (2002), *“Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas”*. São Paulo, Brasil.
- Cavaco, E. S., Bastos, A., Santos, F. A. (2017), *“Effects of corrosion on the behaviour of precast concrete floor systems”*. Journal Construction and Building Materials. N. 145: 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.044>.
- Cholfe, L., Bonilha, L. (2018), *“Concreto protendido: teoria e prática”*. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil, p. 360.
- Hanai, J. B. (2005), *“Fundamentos do Concreto Protendido”*. E-book. São Carlos.
- Kang, T., Bondy, K. B. (2008), *Recommendations for Design of Post-Tensioned Slab-Column Connections Subjected to Lateral Loading*. PTI Journal, Post Tensioning Institute. Vol. 6, n° 1.
- Loureiro, G. J. (2006), *Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, ed. 44.
- Pfeil, W. (1984), *“Concreto Protendido – Introdução”*. LTC. Rio de Janeiro.

- Romanichen, R. M., Souza, R. A. (2019), *Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V. 12. N. 4, p. 812 – 831. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400006>.
- Santos, J. S. D. (2017), *“Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido”*. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos. p. 127.
- Silva, G., Prata, B., Albuquerque, A. (2018), *Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto*. Ambiente Construído. Vol. 18, n. 1, p. 313-325. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100223>.
- Silva, R.C. (2003), *“Vigas de concreto armado com telas soldadas: análise teórica e experimental da resistência à força cortante e do controle da fissuração”*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 328.
- Silveira, M. C. A. (2002). *“Práticas de Projeto e Execução de Edificações Protendidas com Cordoalhas Engraxadas e Plastificadas”*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte.
- Souza, F. A. (2018), *“Radier simples, armado e protendido – Teoria e Prática”*. Editora Catarse. São Paulo, Brasil, p. 312.
- Souza Junior, O. A., Oliveira, D. R. C. (2016), *“Influence of the tendon’s layout on the shearing resistance of prestressed concrete beams”*. Revista Ibracon de estruturas e materiais. Vol. 9, N. 5. p. 765 – 795. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000500008>.
- Vicente, C. M. D. S., Albino, J. P. D. C. (1994), *“Lajes em Concreto Armado e Protendido”*. Editora da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Brasil, p. 584.
- Xin, F., Xianyan, Z. (2012). *“Experimental research on crack width of retard bonded partially prestressed concrete beams”*. International Conference on Advances in Civil Infrastructure Engineering. Hunan.

Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos

A. Sánchez¹ , E. Alonso^{1,2*} , W. Martínez² , H. Chávez² , M. Navarrete² ,
M. Arreola² , J. Borrego² , L. Equihua² , E. Núñez² , O. Miranda²

*Autor de Contacto: elia.alonso@umich.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>

Recepción: 01/03/2022 | Aceptación: 19/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

Se analizaron modificaciones presentadas por distintos estabilizadores (cal, cemento, fibra de nopal, líticos de río, líticos volcánicos, sulfato de sodio y yeso) en propiedades y envolvente de falla de un suelo arcilloso natural remoldeado de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Al suelo arcilloso se le realizó granulometría, hidrometría, pruebas índice, compresión simple y prueba Proctor; a las mezclas estabilizadas se determinó la variación en propiedades índice y envolvente de falla. Las adiciones propuestas mejoraron el comportamiento del suelo altamente plástico, disminuyendo las deformaciones volumétricas e incrementando su resistencia mecánica normal, al cortante y ángulo de fricción interna. La investigación contribuye favorablemente a la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas. La investigación fue realizada en laboratorio bajo normatividad internacional.

Palabras clave: estabilización de suelos; propiedades mecánicas; cortante; cohesión; ángulo de fricción interna; restauración.

Citar como: Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O. (2022), “*Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos*”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 227 – 247, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>

¹ Faculty of Architecture, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

² Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

Contribución de cada autor

En este trabajo la experimentación fue llevada a cabo por O. Miranda (50%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%); la actividad de búsqueda bibliográfica O. Miranda (25%), L. Equihua (25%), A. Sanchez (25%) y E. Alonso (25%); la actividad de extracción de información por E. Nuñez (20%), J. Borrego (20%), A. Sanchez (20%), E. Alonso (20%), W. Martinez (20%); análisis y discusión de resultados por M. Navarrete (25%), M. Arreola (25%), J. Borrego (25%), H. Chavez (25%); la redacción del documento por A. Sanchez (20%), H. Chavez (20%), W. Martinez (20%), M. Navarrete (20%) y M. Arreola (20%); la revisión del texto por E. Alonso (20%), H. Chavez (20%), M. Arreola (20%), M. Navarrete (20%) y J. Borrego (20%); el diseño de figuras y la adaptación al formato por W. Martinez (25%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%) y O. Miranda (25%); traducción al inglés A. Sanchez (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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Modifications of the rupture envelope in clayey soils with different volumetric stabilizer

ABSTRACT

The modifications of seven different stabilizers (lime, cement, nopal fibers, river sand, volcanic sand, sodium sulphate and gypsum) on a clayey soil of Santiago Undameo, in Michoacan, Mexico, were analyzed to observe the changes in the properties and the rupture envelope. Sieve analysis, hydraulic sedimentation, index properties, compressive strength and Proctor were performed to the natural soil; while the variation of the index properties and the rupture envelope were determined for the stabilized mixtures. The additions improved the behavior of the high plasticity soil, diminishing the volumetric deformations and increasing the mechanical resistance, shear strength and angle of internal friction. This research contributes positively to the restoration of earthen heritage buildings, civil works, construction pathologies and construction technologies. The research was performed in the laboratory under international standards.

Keywords: soil stabilization; mechanical properties; shear strength; cutting; cohesion; angle of internal friction; restoration.

Modificações do envelope de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos

RESUMO

Foram analisadas as modificações apresentadas por diferentes estabilizantes (cal, cimento, fibra de figueira-da-índia (palma), lútics fluviais, lútics vulcânicos, sulfato de sódio e gesso) nas propriedades e envoltório de ruptura de um solo argiloso natural remodelado de Santiago Undameo, em Michoacán, México. Granulometria, hidrometria, testes de índice, compressão simples e teste de Proctor foram realizados no solo argiloso. A variação nas propriedades de índice e envoltório de ruptura foram determinadas para as misturas estabilizadas. As adições propostas melhoraram o comportamento do solo altamente plástico, reduzindo deformações volumétricas e aumentando sua resistência mecânica normal, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno. A pesquisa contribui favoravelmente para a restauração de construções de terra do patrimônio histórico, obras civis, patologias em edifícios e tecnologias de construção. A pesquisa foi realizada em laboratório utilizando normas internacionais.

Palavras-chave: estabilização do solo; propriedades mecânicas; resistência ao cisalhamento; coesão; ângulo de atrito interno; restauração.

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
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
BTC	Bloque de Tierra Comprimida
UU	No Consolidado no Drenado
MT	Muestra Testigo
C	Cal
CP	Cemento Portland
FN	Fibras de Nopal
LR	Líticos de Río
LV	Líticos Volcánicos
SS	Sulfato de Sodio
Y	Yeso
UMSNH	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
A	Actividad
IP	Índice Plástico
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
C _{Lin}	Contracción Lineal
C _{Vol}	Contracción Volumétrica
CH	Arcillas de Alta Plasticidad
CL	Arcillas de Baja Plasticidad
MH	Limo de Alta Plasticidad
ML	Limo
OH	Arcilla Orgánica
OL	Limo Orgánico

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos, también denominados arcillas, son empleados para muchas aplicaciones, entre ellas como material de construcción, y son elementos esenciales para nuestra sociedad desde las primeras etapas de la civilización hasta nuestra época moderna. Diferentes elementos constructivos como el adobe han sido empleados en culturas y lugares muy diversos, como es el caso del continente europeo y el americano, con ejemplos de una antigüedad excepcional (Mauricio, et al., 2021). Podemos encontrar importantes ejemplos del uso de suelos como elementos impermeables en núcleos de presas y cuerpos de agua para la agricultura y para riego, fabricación de cemento Portland, construcción de vías terrestres y carreteras, para elaborar piezas y componentes cerámicos, en la arquitectura vernácula y de tierra, como elementos para restauración de estructuras históricas e inmuebles patrimoniales, para humedales, limpieza y tratamiento de agua.

Debido a su fácil accesibilidad y abundancia del material en muchas y variadas regiones del planeta, los suelos arcillosos cuentan con una excelente apreciación debido a sus propiedades sostenibles y al bajo impacto energético y medioambiental que generan (Costa et al., 2019). Las arcillas son por definición sedimentos minerales constituidos principalmente por agregados de silicatos de aluminio hidratados y granulometría finamente dividida. Adicionalmente, las arcillas cuentan con excelentes propiedades aglutinantes, motivo por el que históricamente han sido utilizadas como materiales cementantes (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

En México, existen diferentes tipos de arcillas las cuales se han utilizado para la construcción a lo largo de tiempo; en especial, en el estado de Michoacán, encontramos la presencia de arcillas en componentes de construcción tales como mampostería de adobe, ladrillos cerámicos, morteros de unión y aplanados de tierra, entre muchos otros. Santiago Undameo, población localizada al nor-oriental del estado de Michoacán cuenta con uno de los bancos de arcilla más importantes de la región debido a la cercanía con la capital del estado, Morelia, (Ver Figura 1) cuyo centro histórico está inscrito en la lista de sitios de Patrimonio Cultural de la Humanidad de la UNESCO, y cuenta con más de 1000 inmuebles con carácter patrimonial, todos ellos construidos con técnicas de edificación tradicionales y coloniales, con un uso extendido de los suelos arcillosos y otros materiales locales de la región.



Figura 1. (a) Localización del estado de Michoacán dentro de México; (b) Localización del municipio de Morelia, incluyendo Santiago Undameo, dentro del estado de Michoacán.

Los suelos provenientes de esta localidad cuentan con una proporción de material arcilloso, que por sus propiedades de alta plasticidad presentan inestabilidad provocando cambios volumétricos considerables en contacto con el agua, lo cual suele provocar patologías en edificaciones y obra civil. Históricamente, gran variedad de materiales han sido usados como estabilizantes de las

arcillas, para disminuir la alta plasticidad higroscópica que éstas presentan, y consecuentemente reducir la retracción y la expansión lineal y volumétrica en contacto con el agua (Daneels et al., 2020). Esta estabilización es esencial para ámbitos como la arquitectura y construcción con tierra, las bases y subbases de pavimentos flexibles; ya que ayuda a incrementar la durabilidad de estas estructuras a medida que aumentan las resistencias mecánicas (Laborel-Préneron et al., 2021), siendo todas estas propiedades muy apreciadas en el sector de la construcción.

El interés de la presente investigación subyace en la complejidad de los suelos analizados en Santiago Undameo, ya que (históricamente) éstos han presentado una alta plasticidad y consecuentemente deformaciones volumétricas considerables que provocan una afectación en la estabilidad de las construcciones existentes en la región de estudio.

Por otra parte, la arquitectura de tierra en el estado de Michoacán y en general en México, pese a su riqueza, variedad e importancia cultural, ha sido desplazada y abandonada, por lo que es esencial aumentar los trabajos de investigación sobre este recurso sostenible y de fácil acceso a las comunidades. Además, entender el comportamiento de estos suelos arcillosos en combinación con distintos estabilizantes ayudará a mejorar el trabajo de intervención, restauración y comprensión de las patologías existentes.

Existen muchos materiales que se usan como estabilizadores de arcillas para la construcción, muchos de ellos con antecedentes en estudios científicos: cal (Taallah y Guettala, 2016; Navarro Mendoza et. al., 2019), cemento portland (Dao et al., 2018; Jitha et. al., 2020), fibra deshidratada pulverizada de cactus opuntia ficus indica (Ige y Danso, 2020; Li Piani, 2020), lútics de río, lútics volcánicos, sulfato de sodio, y yeso (sulfato de calcio hemihidratado) (Martínez, et al., 2018).

Las estabilizaciones con cemento, cal y soluciones alcalinas son las más comunes a nivel global (Abhilash, et al., 2022), además, en otras investigaciones se han empleado cenizas de bagazo de caña de azúcar como una alternativa en el mejoramiento de los suelos en sus características físicas como el confinamiento, densificación y estabilidad volumétrica, y químicas a través de las reacciones del agente estabilizador (cemento o cal) con el agua (Moraes et al., 2015; Ojeda Farías et al., 2018).

Podemos encontrar una abundante bibliografía acerca del uso de fibras y materiales vegetales, su principal uso siempre ha sido evitar la retracción y fisuración de elementos compactos de edificación, como los adobes, ayudando a mejorar sus capacidades mecánicas (Yetgin, et al., 2008), encontrando varias investigaciones relevantes que lograron mejorar las propiedades de la mampostería (Sharma, et al., 2015; Araya-Letelier, et al., 2021). Sin embargo, actualmente el desarrollo de técnicas mejoradas de construcción en tierra, como es el BTC ha permitido buscar soluciones incluyendo fibras de muy distintos orígenes en combinación con otros estabilizantes como CP o C (Nagaraj, et al., 2014; Taallah y Guettala, 2016; Navarro Mendoza, et al., 2019).

En México, el uso de los productos derivados del cactus opuntia ficus indica, popularmente conocido como nopal, es muy común en la construcción, tanto en forma de mucílagos como de fibras. Una de las formas más frecuentes en la región de utilizar el mucílago es hirviendo la cactácea y adicionando el líquido a las mezclas de morteros, siendo una solución recomendada por las instituciones reguladoras del patrimonio para intervenir y restaurar edificios históricos; con este método se han monitoreado incrementos en la resistencia mecánica y alta trabajabilidad de las mezclas (Martínez et al., 2008). Además, estudios correlativos con otras adiciones y estabilizantes de uso histórico han mostrado un mejor comportamiento mecánico en materiales con la adición del mucílago (Alonso et al., 2002).

En este estudio se utilizaron siete materiales estabilizadores para mejorar el comportamiento de la arcilla de Santiago Undameo en una muestra testigo (MT). Se utilizó cal (C), cemento portland (CP), fibra deshidratada pulverizada de nopal cactus opuntia ficus indica (FN), lútics de río (LR), lútics volcánicos (LV), sulfato de sodio (SS), y yeso (Y) (sulfato de calcio hemihidratado). Para medir los cambios generados en el material analizado se realizaron ensayos triaxiales no

consolidados no drenados (UU), hidrometría, granulometría y prueba Proctor tanto para las muestras testigo, como en mezclas mejoradas. El análisis a las muestras adicionadas con diferentes materiales estabilizadores proporcionará información relevante que coadyuve al mejoramiento en las técnicas y utilización de la arcilla como elemento de construcción en obras de carácter moderno y conservación del patrimonio edificado.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Las muestras de suelo se obtuvieron del banco de arcilla de Santiago Undameo, localidad muy cercana a la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán, en México. El banco está localizado en 19°42' latitud norte y 101°11.4' longitud oeste, en la riberas de la presa de Cointzio (ver Figura 2), donde se producen adobes y ladrillos de arcilla recocida hechos a mano (ver Figura 3), que dan lugar principalmente a la vivienda rural de las comunidades cercanas. Después de muestrear y tomar los especímenes de suelos, estos fueron transportados al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, donde se llevó a cabo la presente investigación.

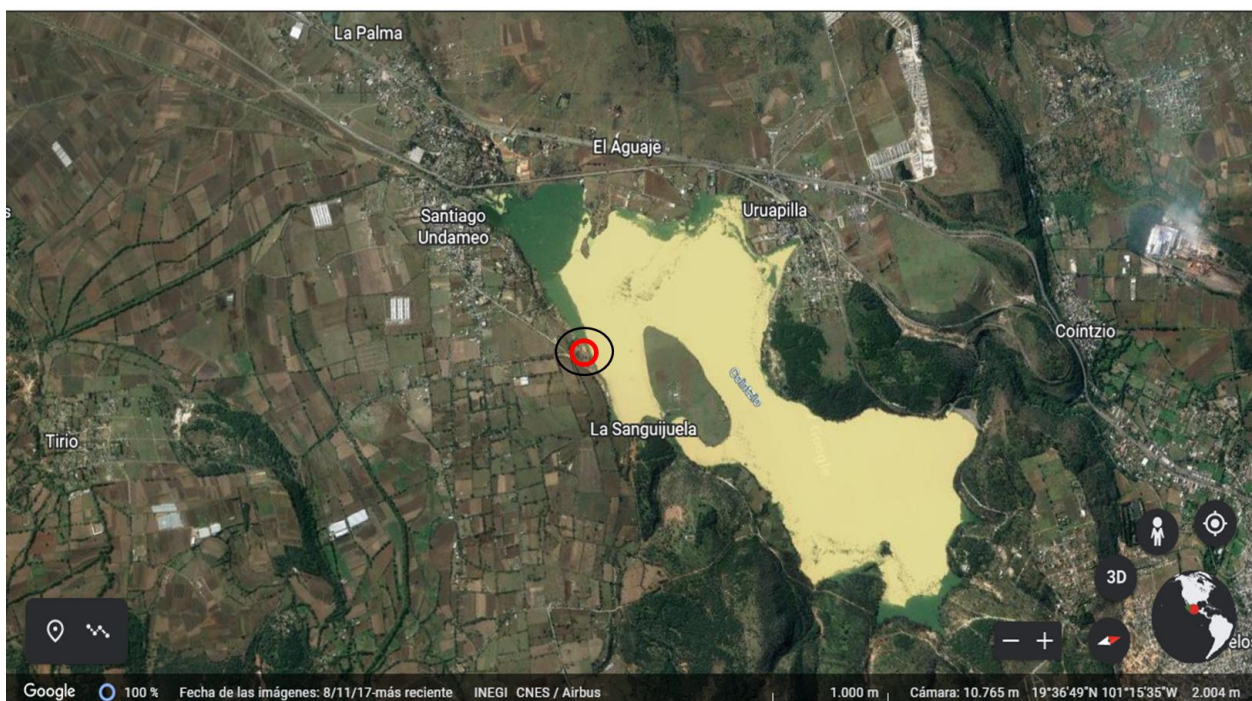


Figura 2. Ubicación del banco de material en Santiago Undameo (Fuente: Google Earth, 2022).



Figura 3. (a) Banco de suelo arcilloso precursor de Santiago Undameo; (b) Producción y elaboración de componentes de construcción.

Todos los ensayos propuestos en el presente documento se realizaron por triplicado. Las pruebas se realizaron tanto al suelo testigo como posteriormente a los suelos estabilizados. En la Tabla 1 pueden observarse los estabilizadores empleados, así como el porcentaje en peso utilizado para las mezclas diseñadas.

Respecto a los líticos, el LR proviene del banco “El Cuervo” en la localidad de Huajúbaro, México, coordenadas; longitud (dec): 100.742500, latitud (dec): 19.403333 y 1800 msnm, siendo áridos silíceos de morfología redondeada; mientras que el material LV proviene del banco “Joyitas”, también localizado en el estado de Michoacán, coordenadas; longitud (dec): 101.380000, latitud (dec): 19.730000 y 2082 msnm, carretera Morelia-Quiroga, siendo áridos andesíticos con forma irregular.

Es importante destacar que en estudios previos se realizó un barrido con cada una de las adiciones con porcentajes de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10% en peso del suelo (Flores Rentería, 2010), para encontrar los contenidos óptimos de cada estabilizante, concluyéndose que los mejores comportamientos mecánicos fueron los indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentajes de los Estabilizadores en peso.

Estabilizadores	% Estabilizante
C	3.0
CP	3.0
FN	0.5
LR	10.0
LV	10.0
SS	0.5
Y	6.0

En la presente investigación se realizaron varias pruebas y ensayos para la caracterización de los suelos, que aparecen representados en la Tabla 2. Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Tabla 2. Ensayos aplicados en la investigación y normas que se siguieron.

Prueba	Norma
Límites de Consistencia y Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	ASTM D2487-17 ASTM D4318-17
Granulometría	ASTM C136/C136M-19
Hidrometría	ASTM D7928-17
Triaxial no consolidada no drenada (UU)	ASTM D2850-15 UNE-EN ISO 17892-8:2019
Proctor Estándar variante A	ASTM D698-12
Granulometría < malla n° 200	ASTM D421-85(2007) W2016
Granulometría > malla n° 200	ASTM D 422-63(2007) W2016

La prueba triaxial no consolidada no drenada se realizó con tres distintos confinamientos (σ), para cada una de las mezclas estudiadas, como puede observarse en la Tabla 3. Una vez fallados los especímenes se dejaron en el horno por 24 horas a aproximadamente 105 +/-5 °C según la normatividad para conocer la humedad.

Tabla 3. Pruebas UU y presiones de confinamiento aplicadas.

Muestra	Confinamiento (kgf/cm ²)
1	$\sigma_3 = 0.3$
2	$\sigma_3 = 0.6$
3	$\sigma_3 = 0.9$

La distribución granulométrica del suelo natural testigo, para partículas retenidas en malla ASTM n° 200, se realizó siguiendo la norma ASTM D421-85 (2007) W2016; mientras que el material que sí pasó la malla ASTM n° 200 fue analizado mediante la prueba de sedimentación del hidrómetro, con una duración aproximada de una semana para tomar lecturas periódicas acorde a la norma ASTM D 422-63 (2007) W2016. Para clasificar las muestras de suelo arcilloso, se empleó el SUCS regido por la norma ASTM D-2487-17, siendo este sistema el de uso más extendido en la práctica geotécnica. La resistencia al corte se obtuvo utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb, ley constitutiva del año 1773 que permite conocer la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (φ). Por otro lado, para la obtención de los especímenes reconstituidos de las pruebas triaxiales UU, se adicionaron los estabilizadores, homogeneizándose e igualando la reconstitución con el Peso Volumétrico Seco Máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima ($\omega_{\acute{o}pt}$) obtenidos de la prueba Proctor Estándar (variante A). La humedad óptima ($\omega_{\acute{o}pt}$) es el contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de partículas y la relación de vacíos mínima ($e_{m\acute{i}n}$) y también de esta manera el mayor peso volumétrico del material seco, para una determinada energía de compactación, y al peso volumétrico correspondiente se le designa como peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). El índice de actividad de la arcilla (A) se obtuvo del análisis del hidrómetro, (ASTM D 422-63, 2016) usando la expresión (1). La figura 4 presenta la variación de A para diferentes minerales arcillosos.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla en peso menos a } 2\mu m} \quad (1)$$

En donde:

A= actividad de la arcilla

IP = índice plástico

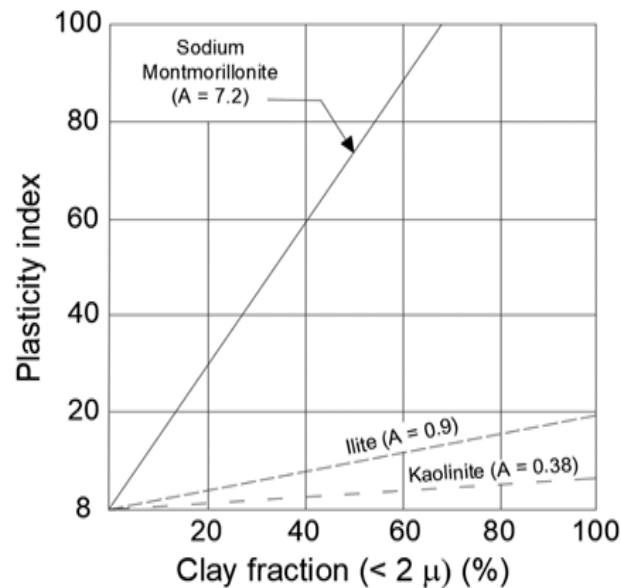


Figura 4. Actividad y correlación entre IP y el porcentaje de fracción de la arcilla < 2 μm (%). (Skempton, 1953).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se investigó la modificación de la envolvente de falla en suelos arcillosos con diferentes estabilizadores volumétricos. Por lo tanto, en el transcurso del siguiente apartado se analizarán y discutirán los resultados obtenidos, primeramente, analizando los resultados de las pruebas realizadas al suelo natural remoldeado que actuó como testigo (MT) y posteriormente correlacionando los resultados de las mezclas de suelo también remoldeados, estabilizadas con las siete distintas adiciones.

3.1 Análisis de las muestras de suelos testigo

Los resultados de las pruebas índice se presentan en la Tabla 4, incluyendo la humedad (ω), LL, LP, IP, C_{Lin} y C_{Vol} respectivamente.

Tabla 4. Propiedades índice del suelo de Santiago Undameo, México.

Material	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	C_{Lin} (%)	C_{Vol} (%)
MT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos de la granulometría gruesa del suelo arcilloso, realizada tamizando el material con mallas ASTM; y la granulometría fina, que se obtuvo a partir de la prueba de sedimentación con el hidrómetro, en escala semilogarítmica. A partir de este último ensayo se obtuvo la A de la arcilla.

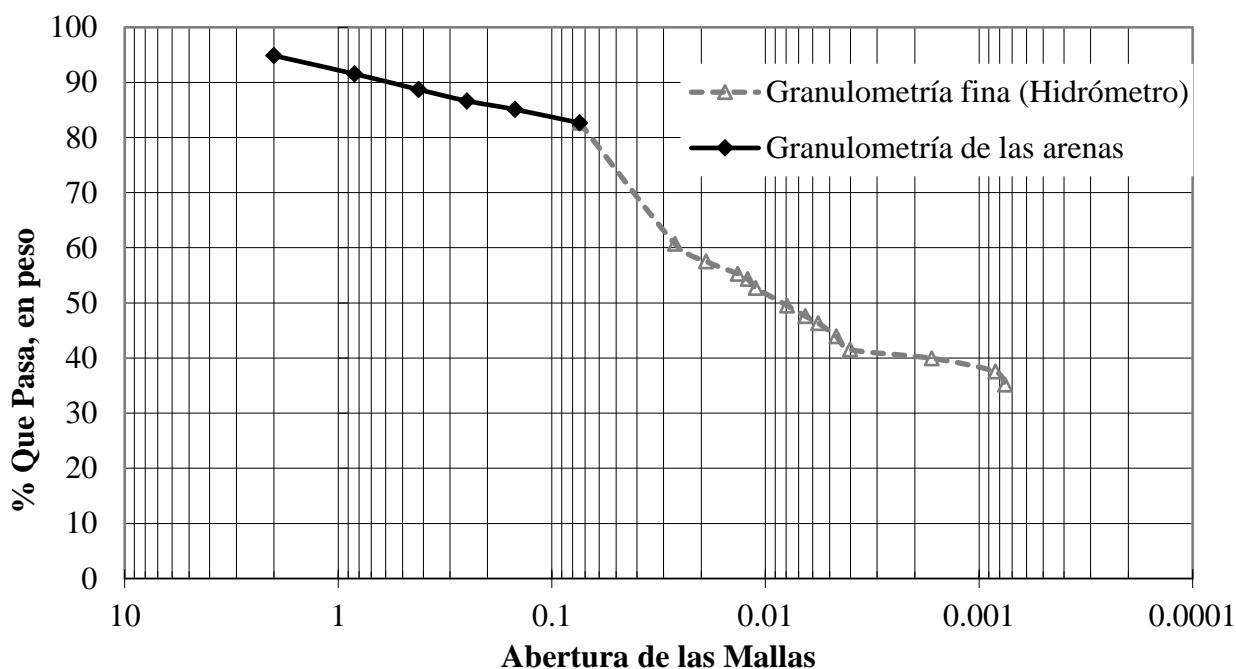


Figura 5. Análisis granulométrico combinado de suelo grueso y suelo fino de la muestra testigo.

Del análisis granulométrico resultó que el 82% del material pasó la malla ASTM n° 200, clasificándose como un suelo fino. Además, los valores del LL e IP, ubicaron al material dentro de la zona CH, según la clasificación SUCS (ver Figura 6). Se llevó a cabo el análisis hidrométrico para obtener la granulometría fina y determinar A de las arcillas. En la Figura 4 se observa que el porcentaje del material que pasa el filtro, menor a $2\mu\text{m}$, es de 40% lo que nos indica una cantidad considerable de partículas tamaño micrométrico, dentro de la muestra de suelo natural de Santiago Undameo.

A partir del IP obtenido, con un valor del 32.7%, se obtuvo una A de 0.81 (Expresión 1). De acuerdo a Skempton el mineral corresponde a una illita (ver Figura 4), que presenta una A mucho menor que por ejemplo el caso de una montmorillonita. Las illitas presentan inconvenientes para la edificación debido a su tendencia a colapsar y a los cambios volumétricos que presentan al entrar en contacto con el agua, siendo problemáticas para las obras civiles (Mirjalili et al., 2020).

3.2 Análisis del suelo arcilloso la arcilla adicionando los diferentes estabilizadores

Para clasificar el suelo arcilloso (% que pasa la malla ASTM n° 200) con los diferentes estabilizadores, se realizó la prueba de los límites de Atterberg. Los resultados obtenidos se presentan en la carta de plasticidad de la Figura 6, donde la posición del suelo inalterado y de las mezclas estabilizadas reflejan su clasificación según el sistema SUCS. El suelo natural de Santiago Undameo se clasifica como una CH, coincidiendo con los resultados de la A presentada por el material. Todas las muestras de suelos adicionados quedaron localizadas en la zona CL, mostrando la evidencia del cambio de propiedades que aportan los estabilizantes; sin embargo, la mezcla que contenía FN se encontró muy cerca del límite entre las arcillas de alta y baja plasticidad. Por otro lado, la combinación que corresponde al suelo natural con un 0.5% de SS adicionado, se clasificó como una CL (ver Figura 6), presentando la mayor disminución del LL de 52.2% de la muestra testigo a 40.2% (ver Tabla 5).

En los casos de arcillas estabilizadas no patrimoniales (ya que por su disponibilidad permiten obtener más cuantificaciones que las muestras patrimoniales) pueden buscarse ecuaciones de correlación (Parisi et al., 2020; Vasic et al., 2020) entre los resultados de las distintas pruebas físico-

mecánicas (Olacia et al., 2020; Rodríguez et al., 2018; Lan et al., 2020). Las ecuaciones de correlación permiten estimar parámetros, ya sea para validar modelos matemáticos o para encontrar relaciones entre las variables con coeficientes de correlación estadísticamente aceptables, estas correlaciones resultan útiles para estimar los parámetros en proyectos de ingeniería donde se utilicen los suelos arcillosos. Existen varios investigadores que han encontrado ecuaciones de correlación entre las variables del suelo y que les han permitido proponer ecuaciones de correlación con fines prácticos (Akkaya, Özvan, y Özvan, 2019; Chompoorat et al., 2022; Wang et al., 2021; Wu et. al., 2022).

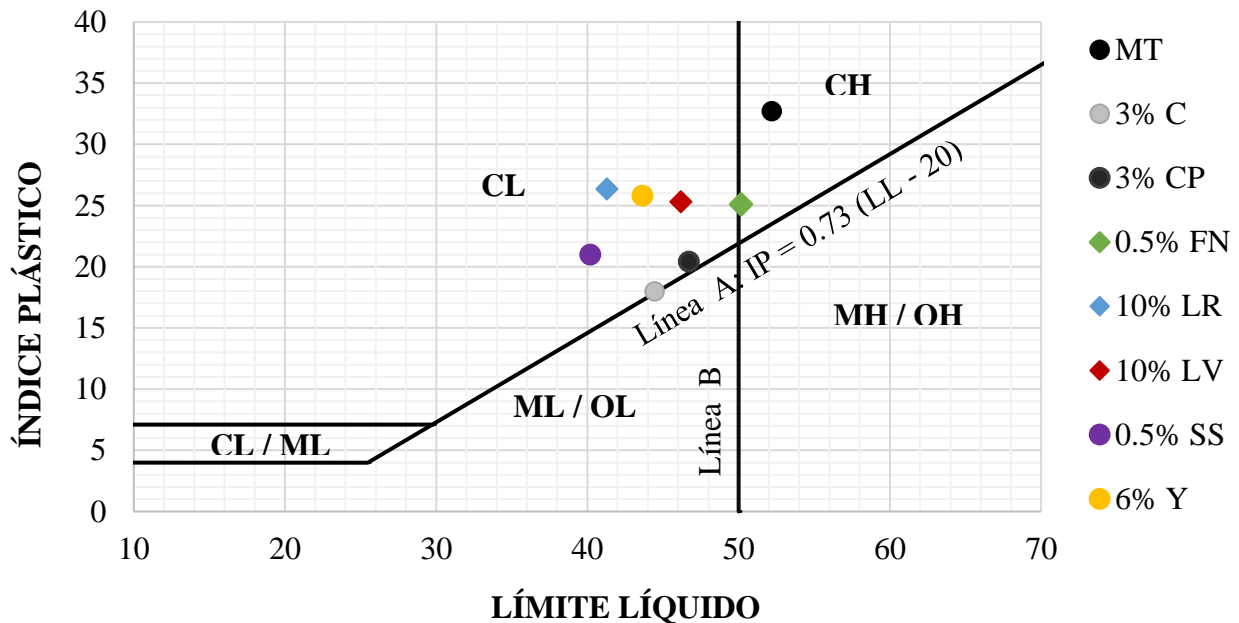


Figura 6. Carta de plasticidad y localización de las muestras originales y estabilizadas.

Tabla 5. Propiedades índices del suelo y las mezclas con los diferentes estabilizadores adicionados.

Material	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	C_{Lin} (%)	C_{Vol} (%)
MT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27
3 % C	44.28	44.44	26.47	17.97	12.05	43.52
3% CP	46.67	46.71	26.29	20.42	12.33	45.46
0.5% FN	49.38	50.17	25.08	25.09	14.86	54.90
10 % LR	41.10	41.30	14.96	26.34	12.31	41.71
10% LV	46.06	46.19	20.89	25.34	10.04	42.98
0.5% SS	40.71	40.20	19.20	20.99	11.02	40.27
6% Y	44.44	43.64	17.84	25.80	12.26	44.72

La Figura 7 muestra el conjunto de las propiedades índice de cada una de las mezclas estabilizadas y el suelo testigo de Santiago Undameo. En dicha figura se puede observar que los estabilizantes reducen el contenido óptimo de agua (ω), el LL y el IP; por otro lado, también provocan un comportamiento irregular del LP y las C_{Lin} y C_{Vol} , lo que podría corresponder a las características particulares de cada adición. Para estas tres propiedades índice (LP, CL, e IP), los valores obtenidos fueron tanto superiores como inferiores al suelo testigo.

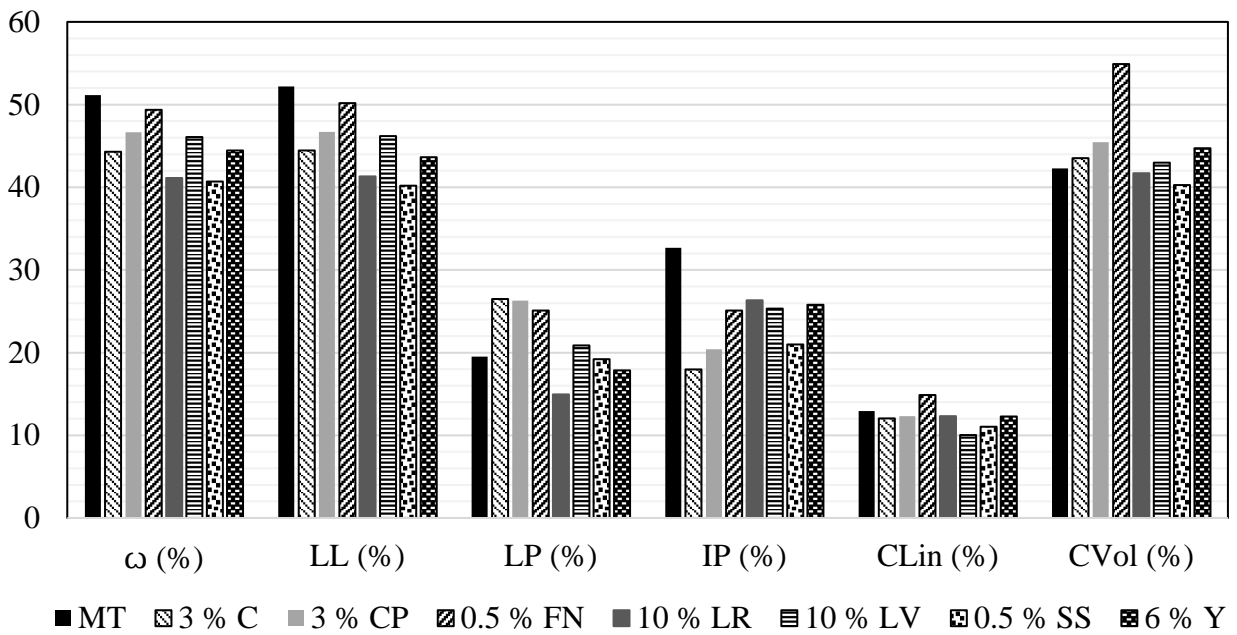


Figura 7. Propiedades índice del suelo testigo y las mezclas con los diferentes estabilizadores adicionados.

La prueba Proctor Estándar determina el contenido de agua necesario para alcanzar el máximo peso específico mediante compactación mecánica (ver Figura 8). En este caso se puede apreciar el efecto de los estabilizadores en la cantidad de agua necesaria y en el incremento o decremento del peso específico máximo posible. Para esta prueba la Figura 8 muestra los comportamientos de la muestra testigo y las mezclas estabilizadas en distintos colores, observando los mayores resultados para LR y los menores para C. Los contenidos óptimos de agua para lograr el máximo peso específico de cada estabilizador se muestran en la Figura 9.

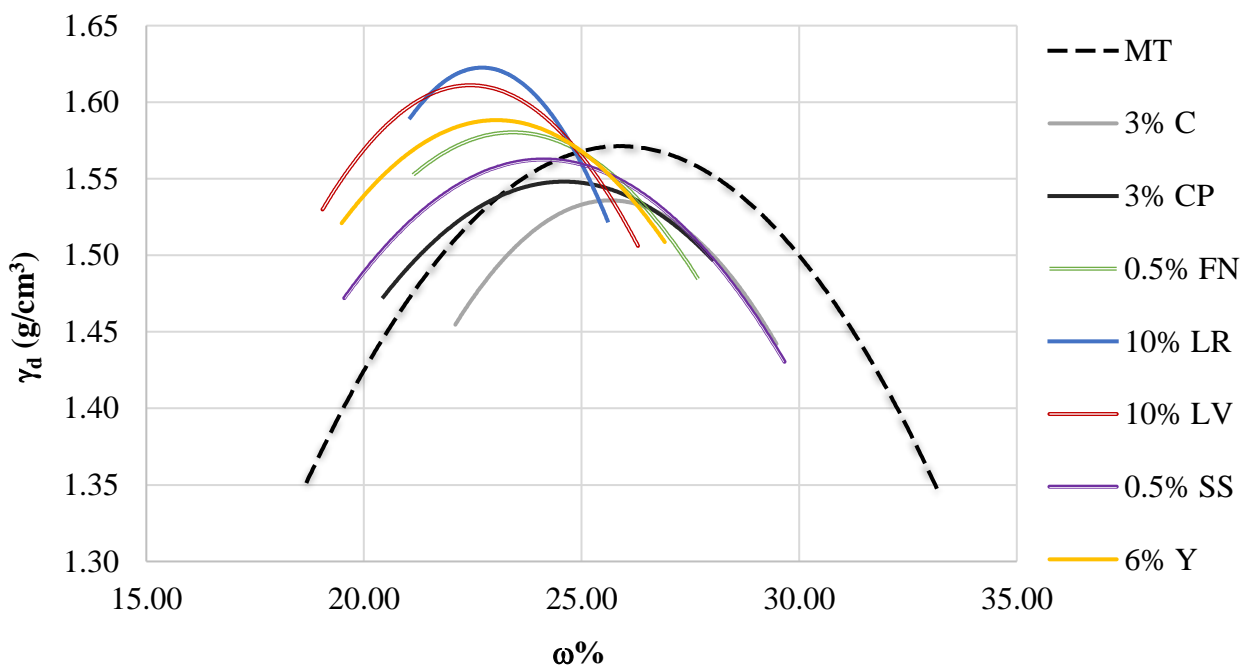


Figura 8. Resultados de la prueba Proctor Estándar (variante A).

La Figura 9 muestra los resultados de la Prueba Proctor Estándar (variante A), permitiendo percibir el efecto que tienen los estabilizadores en cuanto al peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y al contenido óptimo de agua ($\omega_{\acute{o}pt}$) para llevar a cabo su compactación en el laboratorio. Observando el gráfico, podemos discernir una clara disminución del contenido óptimo de agua con la adición de C, CP y FN; dicha disminución de la $\omega_{\acute{o}pt}$ impacta también en un menor $\gamma_{dm\acute{a}x}$, lo que puede ser atribuido a las propiedades de trabajabilidad y plasticidad que caracterizan a estos materiales, sin perder de vista que el agua es un lubricante para el acomodo de las partículas, el óptimo corresponderá al valor mayor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Tanto el CP como C destacan por mantener cierto grado de fluidez durante determinado tiempo para facilitar su uso durante los trabajos de construcción; además, este mismo comportamiento se ha observado en mezclas de morteros base cal y cemento portland que incorporan FN (Díaz-Blanco, et al., 2019; Knapen y Van Gemert, 2009; Ramírez-Arellanes et al., 2012).

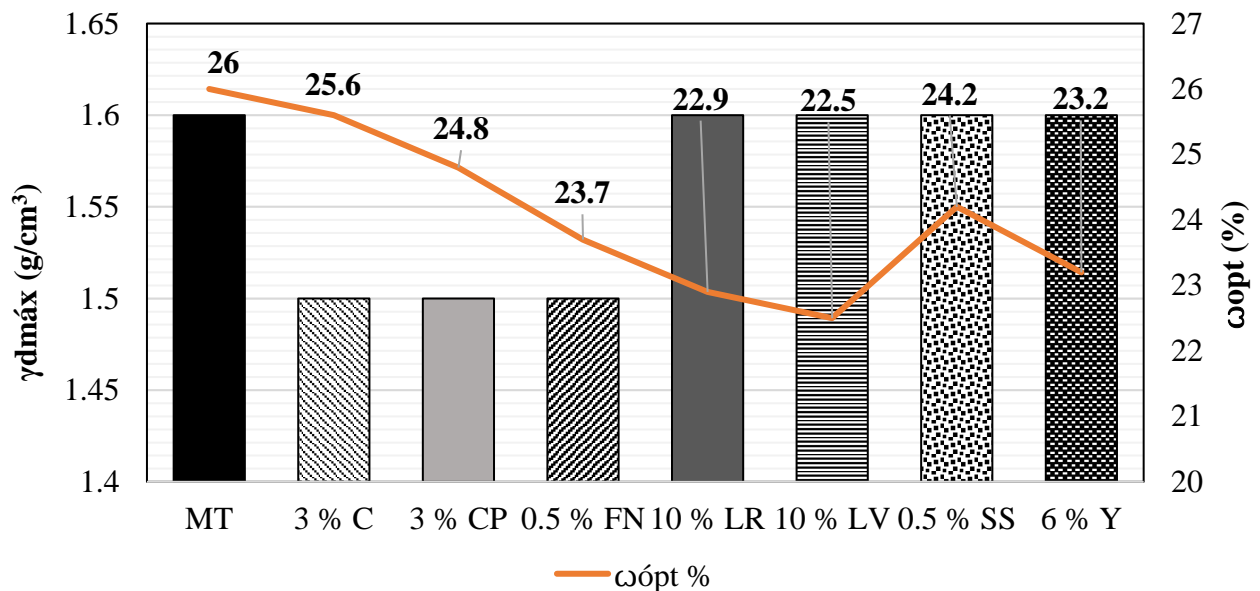


Figura 9. Resultados de la prueba Proctor Estándar (Variante A) en función del contenido óptimo de agua.

Respecto a los líticos utilizados, es evidente que estos no cambian sus propiedades físicas en presencia de agua, por tanto, no interfieren en la $\omega_{\acute{o}pt}$; sin embargo, sí disminuyen el $\gamma_{dm\acute{a}x}$ de la muestra sin adición, lo cual se puede atribuir al tamaño de partícula, porosidad y densidad de la misma, puesto que ocupan mayor volumen que el suelo testigo. El SS se puede comportar en cierta medida como un lítico si el agua se agrega a temperatura ambiente, y además su disolución en la muestra puede ser más lenta que el tiempo necesario para la ejecución de la prueba.

La Figura 9 revela pequeñas variaciones del parámetro $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (Miranda, 2017), mientras que los cambios más significativos son los que ocurren con el contenido óptimo de agua $\omega_{\acute{o}pt}$, con variaciones mucho más notables. Este contenido de agua también es necesario para posteriormente obtener el parámetro $e_{mín}$.

3.3 Pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas (UU)

Para realizar las pruebas triaxiales UU se utilizaron especímenes reconstituídos, para los ocho casos que consideran al suelo natural más las siete mezclas adicionales. Se probaron un total de 144 especímenes (ver Figura 10).

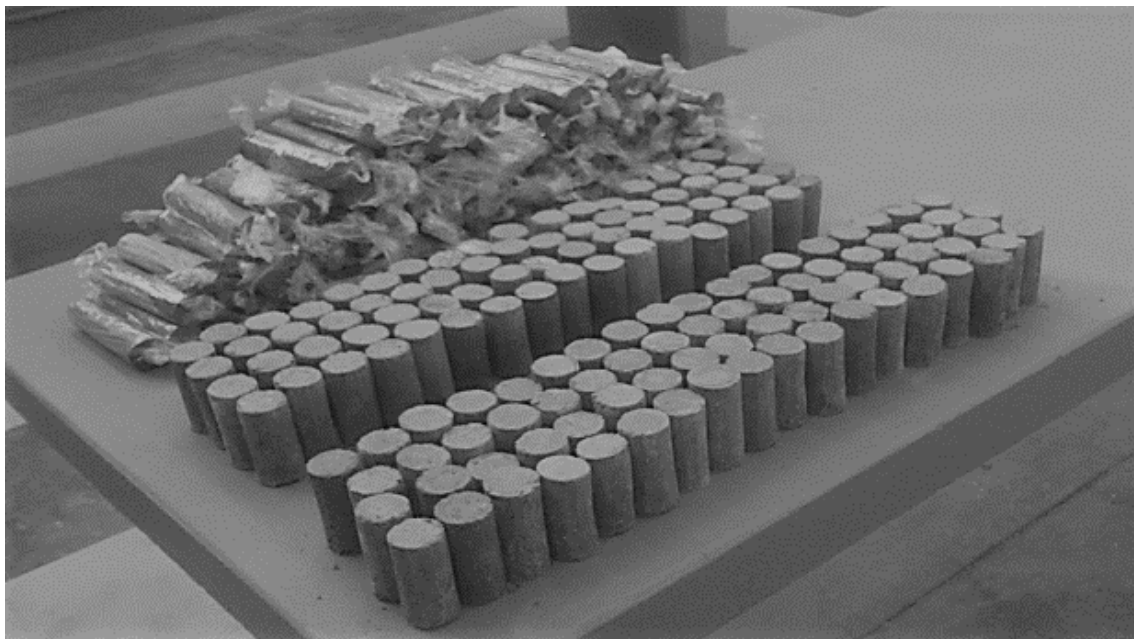


Figura 10. 144 especímenes de suelos arcillosos con distintos estabilizantes para la prueba triaxial UU (Miranda, 2017).

En la Figura 11 podemos observar la correlación entre Esfuerzo desviador (σ) y la Deformación unitaria (ϵ), datos que nos indican el tipo de falla obtenido para cada una de las combinaciones entre el suelo arcilloso testigo y con sus estabilizantes. Las muestras que presentaron una mejora en su plasticidad (CL) presentaron cambios en su comportamiento expansivo. Este comportamiento de las mezclas es muy significativo, ya que puede mejorar a estos materiales e impactar muy positivamente en su uso para aplicaciones de construcción, los estabilizadores pueden ser usados en campo entre muchos otros usos.

Prácticamente todas las mezclas mejoraron su comportamiento en cuanto a esfuerzo a compresión y deformaciones. Es evidente que la mezcla con 6% Y como estabilizante mejora al material rigidizándolo y aumentando su esfuerzo a compresión, esto se observa al presentar una mayor pendiente en la curva descrita por este material.

La estabilización de suelos con yeso no es muy común en la práctica y la información sobre su comportamiento es muy limitada, sin embargo, con los resultados mostrados se ofrece una certeza en su uso, pero es sabido que el yeso es soluble en agua, por lo cual requiere de cuidadosas medidas de protección. Por debajo de las mezclas con Y se encuentran con un comportamiento muy similar las mezclas con C, LR y CP, que son materiales ampliamente utilizados en la estabilización de suelos y se esperaba una mejora en el material, ya que por ejemplo en el caso de mezclas con C, al producirse la reacción de cal y agua el suelo disminuye su permeabilidad y aumenta la capacidad de carga en pocas horas formando finalmente una capa estructural fuerte y flexible (Reginaldo et al., 2018).

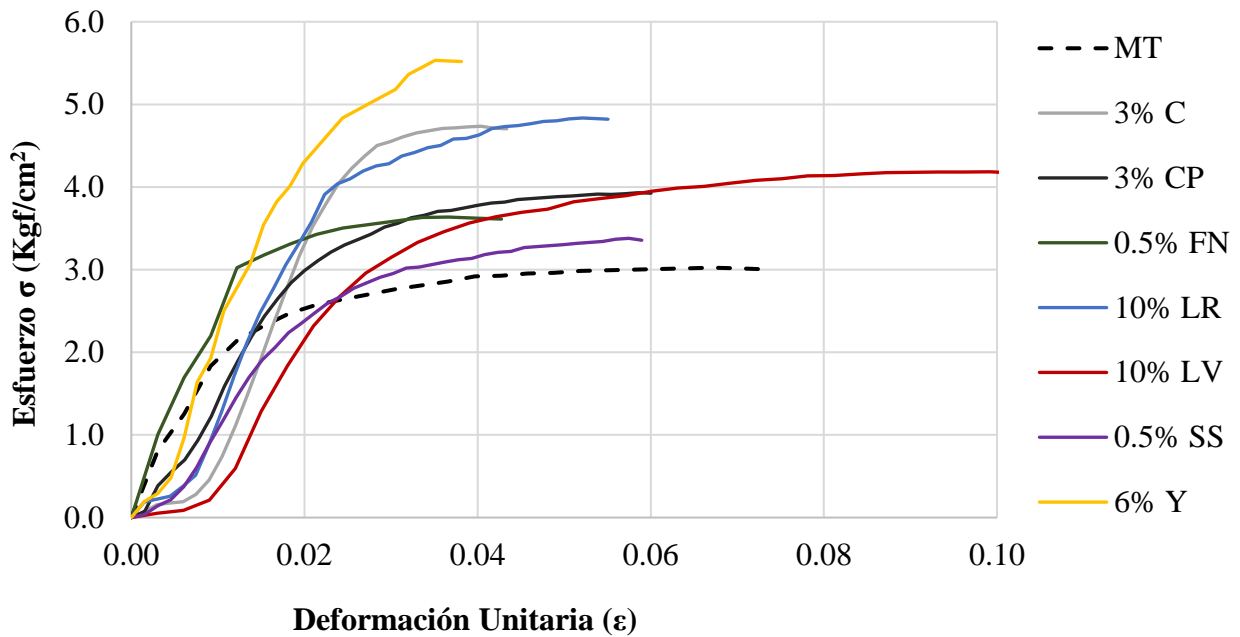


Figura 11. Curvas Esfuerzo desviador σ - Deformación unitaria ϵ .

En la Figura 12 se muestra un ejemplo de envolvente de falla, utilizando al menos 3 círculos de Mohr para conocer la tendencia de la línea envolvente, y con ella, calcular la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (φ).

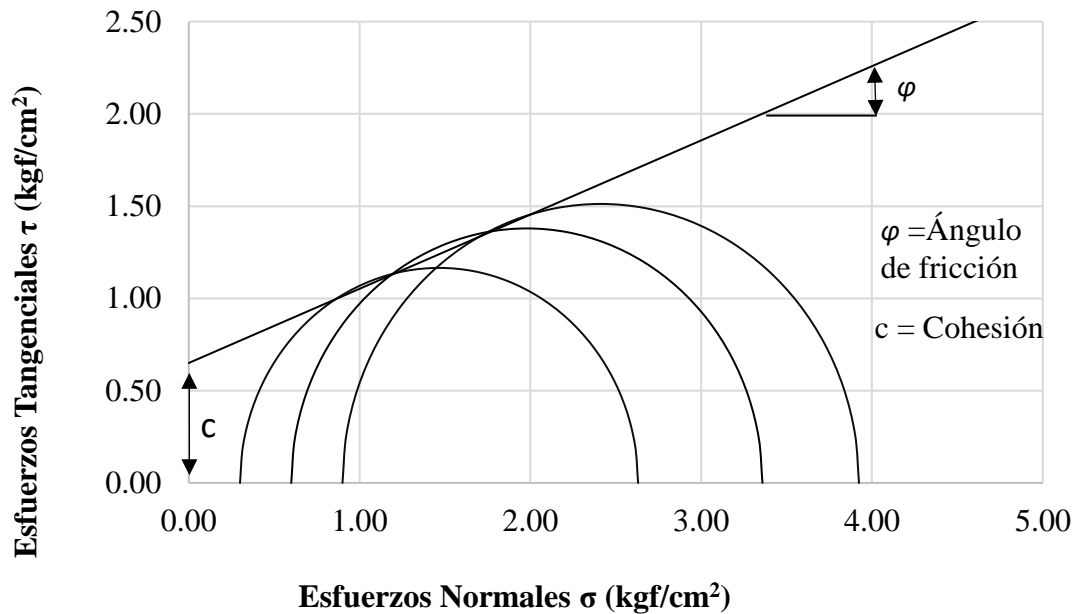


Figura 12. Envolvente de falla obtenida para el suelo natural, obteniéndose $c = 0.65 \text{ kgf/cm}^2$ y $\varphi = 22^\circ$.

A fin de simplificar la observación de las envolventes de falla y su representación gráfica, se presenta la figura 13 con el resumen de resultados de los suelos arcillosos adicionados con los distintos estabilizadores, sin colocar los respectivos 3 círculos de Mohr que dieron origen a la envolvente.

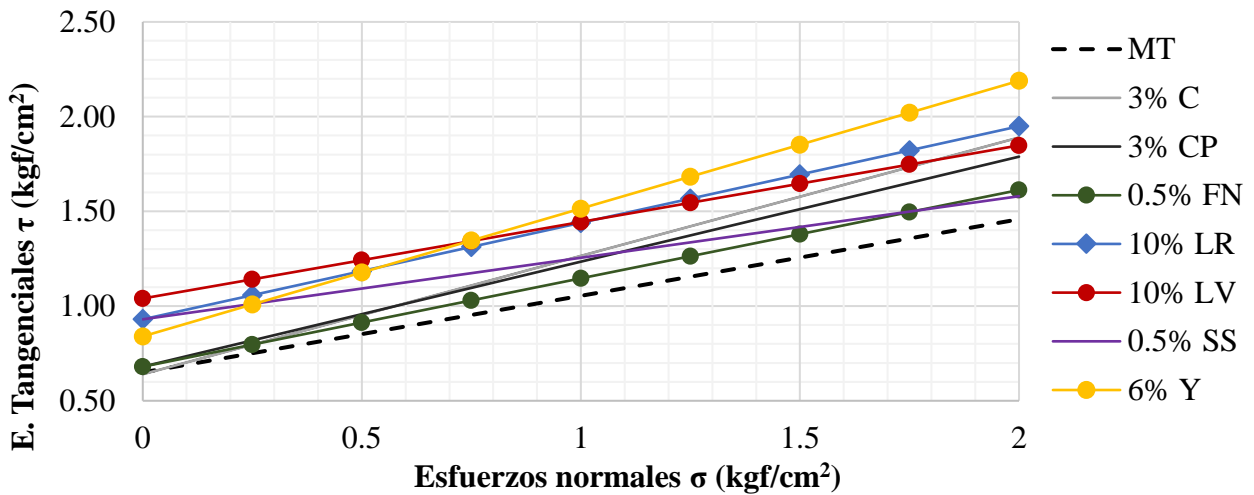


Figura 13. Comparativa de envolventes de falla del suelo arcilloso de Santiago Undameo, natural (Testigo) y con estabilizadores.

En la Figura 14 se puede comprobar como todos los estabilizadores utilizados mejoran en mayor o menor medida la cohesión. La variación en el nivel de mejora de la cohesión (c) depende de las características particulares de cada estabilizador con respecto a esta materia prima o suelo arcilloso natural. En esta prueba destacaron particularmente los LR, LV, SS y Y. Respecto al ángulo de fricción interna (ϕ), se observa un comportamiento inversamente proporcional al presentado por la cohesión, dado que los mejores resultados corresponden a la C, CP y Y; estos tres estabilizadores son materiales que reaccionan químicamente con el agua y forman nuevas fases mineralógicas más resistentes mecánicamente, lo cual impacta positivamente en el valor de ϕ . Resulta muy interesante el hecho de que, Y impacte positivamente en ambas variables, siendo el único estabilizador con este comportamiento.

Cabe mencionar que el incremento del ángulo de fricción interna es más significativo que el incremento de la cohesión, siendo especialmente apreciado y favorable para los usos de los suelos utilizados en la construcción. Esto es debido a que la resistencia mecánica puede variar fácilmente al adicionarse agua a las partículas del suelo, por lo que la capacidad de resistir cobra una mayor importancia debido a la unión entre las partículas del suelo arcilloso.

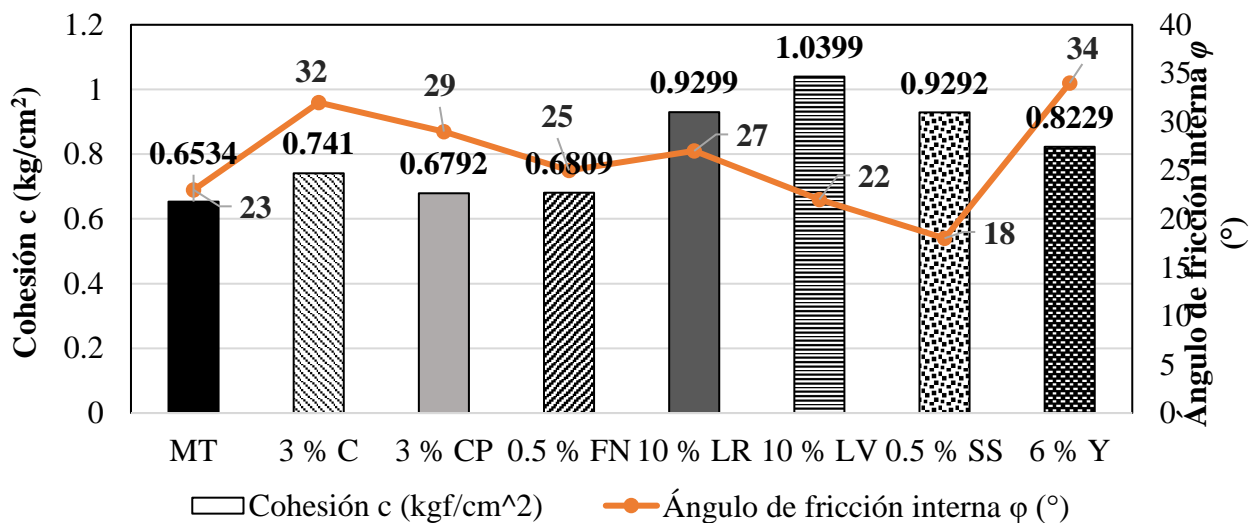


Figura 14. Valores de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ) de la muestra testigo y las mezclas con distintos estabilizadores.

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados corresponden y se limitan al estudio de los suelos arcillosos de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Es importante remarcar que cualquier extrapolación a un material de estudio similar debe ser cuidadosa y basarse en la experimentación directa del mismo. La metodología desarrollada en este trabajo y el grado de innovación de los ensayos respecto al conocimiento de estos materiales pueden ser de gran utilidad en aplicaciones relacionadas con la construcción y la restauración de bienes inmuebles.

Al mejorar un suelo estamos impactando positivamente en nuestro medio ambiente, ya que se logra obtener beneficios ambientales y económicos. por ejemplo, los costos por transporte de los materiales se incrementan sustancialmente con la distancia a la cual se encuentra el sitio de su explotación; se permite, con la estabilización, que aquellos materiales que no cumplen con los requerimientos de normas, como es el caso más frecuente con los materiales que se encuentran in situ, alcancen la resistencia necesaria para que su desempeño, dentro de la estructura del pavimento, sea satisfactoria; o que se logre un mejor comportamiento de estos materiales, disminuyendo espesores de las estructuras de pavimento a construir, lo cual implica que los presupuestos para obras de pavimentación vial se reduzcan de forma significativa y se explote en menor medida las canteras o bancos de material.

Las envolventes de falla a partir de la muestra original (suelo natural remodelado sin estabilizar) permitieron determinar el cambio en el esfuerzo máximo soportado, por medio de la obtención de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna para cada caso (ϕ), siendo este el principal aporte de la investigación.

Los resultados obtenidos demostraron que seis de los estabilizantes adicionados al suelo arcilloso testigo modifican su clasificación SUCS, transitando de CH a CL. La muestra adicionada con 3% C (hidróxido de calcio) mostró mejores resultados comparado con las otras muestras adicionadas, esto debido a que la mezcla se ubicó cerca de la línea límite entre los limos y las arcillas de baja plasticidad. Por otra parte, FN no presentó grandes modificaciones en las propiedades del material, posicionándolo en el umbral entre la alta plasticidad y baja plasticidad. Los estabilizadores aportan muchos otros cambios en las propiedades de los suelos, sin embargo, la plasticidad es uno de los más importantes, debido a los problemas explicados anteriormente que presentan las construcciones de tierra, la infraestructura, y los inmuebles patrimoniales.

Con las envolventes de falla, se observó un cambio en la cohesión c y en el ángulo de fricción ϕ , dando como resultado un incremento en la resistencia mecánica de algunas mezclas. Los estabilizadores que propiciaron mayor fricción entre las partículas del suelo (mayor ϕ) corresponden al Y, C, CP, LR y FN. Por el contrario, LV no aporta incremento de las propiedades mecánicas, resultando en un ángulo de fricción (ϕ) muy similar al del suelo natural; adicionalmente, SS tampoco tuvo mucho éxito en este cometido.

La adición de algunos estabilizadores garantiza un incremento significativo de las propiedades mecánicas de los suelos expansivos. Para el caso particular de la arcilla en Santiago Undameo, el adicionar C y Y como estabilizantes mostraron mejoras en las propiedades físicas y mecánicas. Estos estabilizadores disminuyen la plasticidad y mejoran la trabajabilidad del material siendo una propiedad muy atractiva para usos de construcción y restauración con cambios estéticos y colorimétricos mínimos. Los dos materiales (C y Y) requieren menor cantidad de energía que otros estabilizantes industriales para su producción, por lo que suponen un menor impacto ambiental siendo más sustentables.

En el caso de adobes para conservación del patrimonio vernáculo mexicano, con problemas de supervivencia y dificultades para estabilización con los materiales históricos tradicionales, se demuestra que la cal sigue siendo la mejor opción para estabilización de arcillas, contrastada contra el CP. Sin embargo, este último ha demostrado su utilidad para otros propósitos, como por ejemplo

la elaboración de BTC, una tecnología constructiva de bajo impacto que puede alcanzar resistencias mecánicas considerables y que presenta un mejor comportamiento ante la presencia de agua debido a su proceso de compactación.

Finalmente se puede concluir que las siete adiciones propuestas, al analizarse en el laboratorio bajo normativa internacional ASTM, mejoraron el comportamiento del suelo altamente plástico, al disminuirse las deformaciones lineales y volumétricas y al incrementarse la resistencia mecánica y el ángulo de fricción interna de los suelos arcillosos adicionados. La investigación contribuye favorablemente en el mejoramiento de los suelos arcillosos empleados en la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica y del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de Facultad de Ingeniería Civil, de la UMSNH; del CONACYT con Proyecto Pronaces 321260 y el Programa de Becas Nacionales; de la SEP, Secretaría de Educación Pública en sus programas Prodep/Promep; así como el invaluable soporte técnico de los Ingenieros O. S. Miranda Leal, F. J. Jerónimo Rodríguez, J. I. Bocanegra Torres y P. García Díaz en las cuantificaciones mecánicas, y del LANCIC-UNAM para la micro caracterización del material.

6. REFERENCIAS

- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., Ilampas, R. (2022), Chapter 4. Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. En A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), “*Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials*”, Springer, cap. 4, pp. 127-180. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Akkaya, İ., Özvan, A., Özvan, E. E. (2019), *A new empirical correlation between pressuremeter modules (EM) and shear wave velocity (Vs) for clay soils*. Journal of Applied Geophysics. 171(103865). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103865>
- Alonso, E., Martínez-Gomez, L., Martínez, W., & Castano, V. M. (2002), *Preparation and Characterisation of Ancient-Like Masonry Mortars*. Advanced Composite Letters. 11(1). doi: <https://doi.org/10.1177/096369350201100105>
- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Burbano-García, C., Concha-Riedel, J., Norambuena-Contreras, J., Concha, J., & Saavedra Flores, E. I. (2021), *Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers*. Construction and Building Materials. 276(122127). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (1998). *UNE 103402: Determinación de los Parámetros Resistencia de Una Muestra de Suelo en el Equipo Triaxial*.
- Asociación Española de Normalización (AENOR) (2019), *UNE-EN ISO 17892-8:2019 Investigación y ensayos geotécnicos; Ensayos de laboratorio de suelos, Parte 8: ISO 17892-8:2018 Ensayo triaxial sin consolidación y sin drenaje*.
- ASTM International (2019), *ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. doi: https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM International (2017), *ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. doi: <https://doi.org/10.1520/D7928-17>

- ASTM International (2017). *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International (2017). *ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM International (2021). *ASTM D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³))*. doi: <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM International (2015). *ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- ASTM International. (2007) *ASTM D421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (Withdrawn 2016)*.
- ASTM International (1998). *ASTM D 422-63 (Reapproved 1998) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- Chompoorat, T., Thepamong, T., Khamplod, A., Likitlersuang, S. (2022), *Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing*. Construction and Building Materials. 316(125858). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125858>
- Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F., & Velosa, A. (2019), *The sustainability of adobe construction: past to future*. International Journal of Architectural Heritage. 13: 639-647. doi: <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>
- Daneels, A., Romo de Vivar, A., Chávez, L., Reyes, M., Tapia, E., León, M., . . . Otero, F. J. (2020), *Bitumen-stabilized earthen architecture: The case of the archaeological site of La Joya, on the Mexican Gulf Coast*. Journal of Archaeological Science: Reports, 34(A). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102619>
- Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Rocabruno-Valdés, C. I., Uruchurtu-Chavarín J. (2019), *Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto*. Revista ALCONPAT. 9 (3): 260- 276. doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Kalifala, D., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E., Gomina, M. (2018), *Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement*, Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001>
- Knapen, E., Van Gemert, D. (2009), *Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers*. Cement and Concrete Research. 39(1): 6-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>
- Ige, O. and Danso, H. (2021), *Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction*. Construction and Building Materials. 273(121686). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>
- Jitha P. T., Sunil Kumar B., Raghunath, S. (2020), *Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes*. Construction and Building Materials. 250(118877). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877>
- Laborel-Préneron, A., Faria, P., Aubert, J.-E., Magniont, C. (2021), *Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites*. Recent Progress in Materials. 3(2). doi:10.21926/rpm.2102016
- Lan Guanqi, L., Yihong Wan, Y., Xin, L., Liu, Y. (2020), *Shear test method analysis of earth block masonry mortar joints*. Construction and Building Materials. 264 (119997). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119997>

- Li Piani, T., Weerheijm, j., Peroni, M., Koene, L., Krabbenborg D., Solomos, G., Sluys, L. J. (2020), *Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates*, Construction and Building Materials. 230(117038). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117038>
- Martínez, W., Alonso, E. M., Rubio, J. C., Bedolla, J. A., Velasco, F. A., Torres, A. A. (2008), *Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal Apagada Artesanalmente, Adicionados con Mucílago de Cactácea y Ceniza Volcánica, para su uso en Restauración y Conservación de Monumentos Coloniales*. Revista de la Construcción. 7(2): 93-101.
- Martínez, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez, H. L., Lara, C., Bedolla, A., Ruvalcaba, J. L. (2018), *Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives*. Revista ALCONPAT. 8(2):163-177. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>
- Mauricio, A. C., Grieseler, R., Heller, A. R., Kelley, A. R., Rumiche, F., Sandweiss, D. H., Viveen, W. (2021), *The earliest adobe monumental architecture in the Americas*. PNAS, 118(48). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Miranda Leal O. S. (2017), “*Envolvente de falla en arcilla de Santiago Undameo, con diferentes estabilizadores; realizados en la máquina triaxial Soiltest t-500*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Mirjalili, A., Eslami, A., Morshed, R. (2020), *Experimental investigation into the effect of vertical loading on in-plane cyclic behavior of adobe walls*. Construction and Building Materials. 264(120706). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120706>
- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., . . . Tashima, M. M. (2015), *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. Construction and Building Materials. 94: 670-677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014), *Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks*. International Journal of Sustainable Built Environment. 3(1): 54-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.03.001>
- Navarro Mendoza, E. G., Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M. (2019), “*Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks*”. En C. Neves, Z. Salcedo Gutiérrez, O. Borges Faria (Eds.), 19° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, FUNDASAL / PROTERRA). San Salvador: El Salvador, pp. 284-291.
- Ojeda Farías, O. F., Baltazar Zamora, M. Á., Mendoza Rangel, J. M. (2018), *Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material*. Revista ALCONPAT. 8(2): 194-208. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>
- Olacia, E., Pisello, A. L., Chiodo, V., Maisano, S., Frazzica, A., Cabeza, L. F. (2020), *Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization*. Construction and Building Materials. 239(117669). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>
- Parisi, F., Balestrieri, C., Varum, H. (2019), *Nonlinear finite element model for traditional adobe masonry*. Construction and Building Materials. 223: 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.001>
- Pérez Nora, A., Bucio, L., Lima, E., Soto, E., Cedillo, C. (2016), *Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico*. Microchemical Journal. 126(349-358). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.033>

- Rodríguez-Mariscal, J. D., Solís, M., Cifuentes, H. (2018), *Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks*. Construction and Building Materials. 175: 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.118>
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. de J., Julián-Caballero, F., Gómez-Yañez, C. (2012), *Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Materiales de Construcción. 62(307): 327–341. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211>
- Reginaldo-Sérgio, P., Fabiano-Emmert, E., Pereira-Miguel A. G. (2018), *Soil Stabilization with Lime for the Construction of Forest Roads*. Floresta e Ambiente. 25(2). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.007715>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., Mitrani, A. (2021), *Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples*. Heritage. 4(2): 864-888. doi: <https://doi.org/10.3390/heritage4020047>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2007), *M-MMP-1-07/07. Límites de Consistencia*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2006), *M-MMP-1-09/06. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Compactación AASHTO*.
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015), *Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement*. International Journal of Sustainable Built Environment. 4(2): 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.07.002>
- Skempton, A. W. (1953). “*The colloidal activity of clays*” en: Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering. ICOSOMEF, Zurich: Switzerland, pp. 57-61.
- Taallah, B., Guettala, A. (2016), *The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers*. Construction and Building Materials. 104(1): 52-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Vasic M.V., Pezo, L. L., Radojevic, Z. (2020), *Optimization of adobe clay bricks based on the raw material properties (mathematical analysis)*. Construction and Building Materials. 244(118342). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118342>
- Wang, C., Li, S., He, X., Chen, Q., Zhang, H., & Liu, X. (2021), *Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction*. Geoderma. 404(115293). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293>
- Wu, B., Li, L., Xu, L., Li, X. (2022), *Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator*. Biosystems Engineering. 216:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.017>
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., Çavdar, A. (2008), *The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes*. Construction and Building Materials. 22(3): 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>

Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas

A. L. Ramos^{1*} , E. Bauer² 

* Autor de Contacto: analin.ramos@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

Recepción: 10/01/2022 | Aceptación: 01/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones de exposición a agentes degradantes en edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Conocer la acción de la meteorización es fundamental para comprender la degradación de las fachadas. Para ello, se seleccionaron ocho ciudades: Curitiba, Santa María, Florianópolis, Brasilia, Niterói, Goiânia, Picos y Belém. Se definió un modelo de construcción de simulación higrotérmica para evaluar radiación total, amplitud térmica, choque térmico, índice de intensidad de temperatura y lluvia dirigida. Como resultado, se identifican zonas de condiciones críticas, proporcionando clasificaciones de exposición. Para agentes de temperatura y lluvia dirigida, las zonas más expuestas son Goiânia y Belém. Las zonas de exposición más suaves son Belém para agente de temperatura y Niterói para lluvia dirigida.

Palabras clave: degradación; fachadas; revestimiento cerámico; zonas bioclimáticas; temperatura.

Citar como: Ramos, A. L., Bauer, E. (2022), "Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 248 – 262, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

¹ Aluna de mestrado PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

² Professor Doutor do PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, Ana Lin Ramos contribuyó a la actividad de estructuración y redacción del texto (100%), análisis y discusión de los resultados (100%). Elton Bauer contribuyó a la recopilación de datos de actividad (100%), supervisión (100%) y corrección del texto (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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Study of the facade degradation agents associated with temperature and driving rain in different Brazilian bioclimatic zones

ABSTRACT

Therefore, the aim is to study the conditions of exposure to these degradation agents in buildings located in different Brazilian bioclimatic zones. Knowing the action of weathering is essential to understand the facades degradation. For this purpose, eight cities were selected: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos and Belém. A model building was defined for hygrothermal simulation to assess total radiation, temperature range, thermal shock, intensity index temperature and driving rain. As a result, zones of critical conditions are identified, providing exposure rankings. For temperature agents and directed rain, the most exposed cities are Goiânia-GO and Belém-PA, respectively. Finally, the mildest exposure zones are Belém-PA for temperature agent and Niterói-RJ for driving rain.

Keywords: degradation; facades; ceramic coating; bioclimatic zones; temperature.

Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras

RESUMO

Logo, objetiva-se investigar as condições de exposição a agentes de degradação em edifícios localizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Estudar a ação do intemperismo é essencial para compreender a degradação das fachadas. Selecionou-se oito cidades representativas de cada Zona: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos e Belém. Definiu-se um edifício modelo para simulação higratérmica para avaliação da radiação total, amplitude térmica, choque térmico, índice de intensidade da temperatura e chuva dirigida. Como resultado, são identificadas as zonas de condições críticas, que são classificadas em função de sua gravidade. Para temperatura e chuva dirigida, as cidades mais expostas são Goiânia-GO e Belém-PA, respectivamente. As de exposição mais amenas são Belém-PA para agente de temperatura e Niterói-RJ para chuva dirigida.

Palavras-chave: degradação; fachadas; revestimento cerâmico; zonas bioclimáticas; temperatura.

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 fachada es un elemento constructivo para proteger el edificio del ambiente exterior, lo que provoca su mayor exposición a factores como la radiación solar, la lluvia dirigida y la temperatura. Dicha exposición permite un proceso de degradación complejo que involucra agentes de diferente naturaleza, que pueden actuar en sinergia, afectando el desempeño y la vida útil de los componentes y materiales a través de diferentes mecanismos de degradación (Bauer et al., 2021).

El uso de revestimientos cerámicos en fachadas es habitual y está asociado a un proceso de degradación específico caracterizado principalmente por el desprendimiento (Bauer et al., 2015; Pacheco y Vieira, 2017) además de fisuración, falta de adherencia del soporte cerámico y por la expansión de sustratos debido a la humedad o variaciones térmicas (Bezerra et al., 2018). En este caso, las capas que componen el sistema de revestimiento tienen diferentes propiedades (coeficientes de dilatación térmica, módulo de elasticidad, conductividad térmica, etc.) y es muy relevante la acción de agentes asociados a la temperatura (Gaspar y Brito, 2011).

La variación de la temperatura superficial del revestimiento puede provocar cambios físicos en el sistema de sellado de la fachada (Silva, 2000). Este mecanismo de degradación se da por efecto de la expansión y contracción por variaciones y aumentos no homogéneos de temperatura, lo que provoca esfuerzos cortantes, generando una tendencia a la separación en la interfase del sistema (Saraiva, 1998). Como resultado, se producen desprendimientos y fisuras en el revestimiento cerámico, que pueden intensificarse por la fatiga provocada por los esfuerzos termomecánicos derivados de las variaciones de temperatura, además de las restricciones a la deformación (Barbosa, 2013).

La amplitud térmica ponderada representada por el Índice de Intensidad de Temperatura (Iit), la radiación solar y los choques térmicos se utilizan como valor representativo de la amplitud térmica e indicativo de una mayor degradación. El IIT constituye un análisis de la amplitud térmica obteniendo una medida ponderada en relación con la frecuencia (Nascimento, 2016) y el choque térmico son eventos puntuales caracterizados por una alta diferencia de temperatura superficial en un corto intervalo de tiempo (Zanoni, 2015).

La acción de la lluvia dirigida bajo las fachadas se considera un agente de gran relevancia (Nascimento et al., 2016). Este tiene su origen en la asociación de la lluvia con el viento, y es una de las principales fuentes de agua en las fachadas de los edificios. Sin la acción del viento, la lluvia caería verticalmente y no mojaría significativamente las paredes (Zanoni, 2015). Por la acción del viento, la lluvia golpea principalmente la parte superior y los costados de los edificios. Así, aunque los revestimientos cerámicos sufren menos significativamente la incidencia de la precipitación en comparación con el sistema de mortero (Bauer et al., 2018), es importante considerarlo en las simulaciones higrótérmicas para comprender el proceso de degradación.

La degradación de los sistemas de revestimiento cerámico se caracteriza principalmente por el desprendimiento cerámico, aunque se consideran cambios en el proceso de degradación para diferentes ubicaciones geográficas de las edificaciones (Souza, 2019). Por lo tanto, es necesario estudiar las condiciones de exposición a la acción de los agentes climáticos para comprender las diferentes condiciones que desencadenan el proceso de degradación en diferentes regiones.

Brasil, como país continental, tiene variaciones climáticas en todo su territorio. Por eso, la ABNT NBR 15220-3 (2005) establece la zonificación bioclimática brasileña, clasificando 330 ciudades según su clima en ocho zonas bioclimáticas. Estas se definen como regiones geográficas homogéneas en términos de elementos climáticos que interfieren en la relación entre el entorno construido y el confort humano. Los edificios y sus elementos ubicados en diferentes zonas están sujetos a diferentes condiciones de exposición a los agentes climáticos que provocan el proceso de degradación.

El objetivo de la investigación propuesta es analizar la acción de los agentes de degradación

asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en las fachadas de edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Por ello, se utiliza la simulación higrotérmica mediante el software WUFI Pro 6.5, como herramienta útil a efectos de estudiar la degradación (Bauer et al., 2018; Gonçalves et al., 2018) para obtener datos de radiación solar incidente, temperatura superficial y lluvia dirigida desde las fachadas norte de un edificio modelo sometido a las diferentes condiciones climáticas de cada zona.

2. MÉTODOS

2.1 Detalles de construcción de modelo

Se determina un edificio modelo de 20 metros de altura con un sistema de recubrimiento cerámico de absorbancia 63,5% (Dornelles, 2007) correspondiente al color rojo oscuro, elegido para resaltar los efectos de la temperatura, debido a que los colores oscuros presentan mayor temperatura superficial al ser expuestos. a la radiación (Uchôa et al, 2016). Este modelo se aplica a ciudades ubicadas en las ocho zonas bioclimáticas brasileñas establecidas en la ABNT NBR 15220-3 (2005). En la tabla 1 se muestran las ciudades elegidas y la zona bioclimática correspondiente.

Tabla 1. Ciudad, Estado y Zonas Bioclimáticas.

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Curitiba-PR	Santa Maria-RS	Florianópolis-SC	Brasília-DF	Niterói-RJ	Goiânia-GO	Picos-PI	Belém-PA

2.2 Simulación

La simulación higrotérmica del programa WUFI Pro 6.5 se utiliza para evaluar la acción de los agentes climáticos en las fachadas de cada ciudad. El programa permite el ingreso de datos, tales como: período de simulación, configuración, orientación e inclinación del sistema constructivo, coeficientes de lluvias incidentes y transferencia a la superficie y condiciones iniciales de temperatura y humedad relativa y condiciones climáticas interiores y exteriores (Freitas, 2011).). A partir de ello se obtienen como datos horarios de salida los valores de radiación total incidente en las fachadas, temperatura superficial y precipitación.

El período de simulación cubre el año del 01/01/2019 al 01/01/2020. En cuanto a la definición de las condiciones climáticas exteriores, se utilizan los archivos de Año Meteorológico Típico (TMY) de la base de datos EPW/ANTAC (Roriz, 2012) referentes a cada ciudad. La Tabla 2 contiene los valores adoptados de los coeficientes de transferencia superficial.

Tabla 2. Coeficientes de transferencia a la superficie externa adoptados en la simulación.

Coeficiente	Unidad	Valor
Resistencia Térmica (lado izquierdo)	m ² K/W	0,058
Absorción (radiación de onda corta)	-	0,635
Reflectividad del suelo	-	0,2
Factor de reducción de lluvia incidente	-	0,7

En el estudio, optamos por analizar solo la orientación Norte de cada edificio, ya que es crítico para la incidencia de la radiación solar en las ciudades estudiadas, ubicadas debajo del ecuador. El sistema constructivo simulado está compuesto por: revestimiento cerámico, mortero de enlucido cementoso, bloque cerámico y mortero interior y el punto de control principal en la superficie del

revestimiento. La figura 1 muestra el sistema lanzado en el programa.

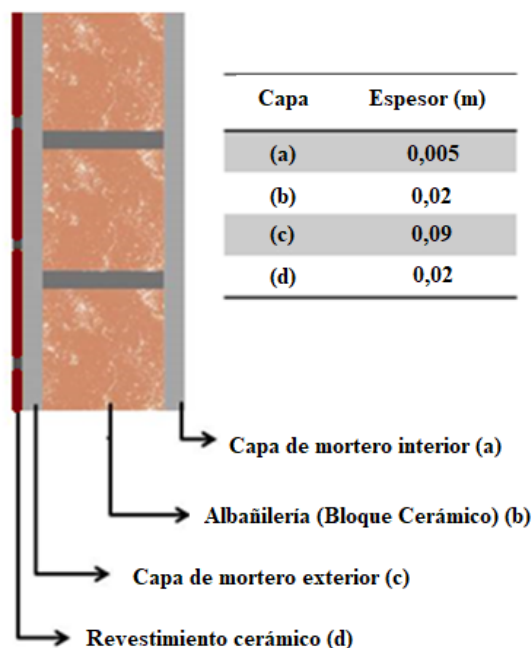


Figura 1. Sistema constructivo evaluado: (a) placa cerámica; (b) mortero externo; (c) bloque de cerámica; (d) mortero interior.

Las propiedades de los materiales componentes de las capas del sistema estudiado son de ensayos previos, realizados por otros investigadores. Tales pruebas son: masa específica aparente, porosidad, permeabilidad al vapor de agua para calcular el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua; coeficiente de absorción de agua o coeficiente de capilaridad; curva higroscópica. Estos ensayos y sus resultados están descritos en el Informe Interno LEM-UnB (Bauer et al., 2015), que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de propiedades del material.

Propiedades	Bloque de cerámica	Plato de cerámica	Mortero
Masa específica aparente (kg/m ³)	578	1730	1830
Porosidad (m ³ /m ³)	0,486	0,29	0,2604
Permeabilidad al vapor de agua (kg/(m.s.Pa))	8,38. 10 ⁻¹²	1,66. 10 ⁻¹²	7,9. 10 ⁻¹²
Coefficiente de absorción de agua (kg/m ² .√s)	0,09	0,001	0,089

2.3 Acción de los agentes asociados a la temperatura.

2.3.1 Radiación total, temperatura superficial máxima y mínima y amplitud térmica máxima.

A partir de los datos de temperatura superficial, se determinan las temperaturas máxima y mínima, así como las amplitudes térmicas diarias durante el período de simulación, calculadas como se muestra en (1). Con los datos de radiación solar se determinó la radiación solar acumulada en la fachada durante el periodo de simulación, sumando los valores diarios observados en cada fachada.

$$\Delta T = t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n} \tag{1}$$

Donde ΔT es la amplitud térmica, t_{max} es la temperatura superficial máxima diaria de la fachada y t_{min} es la temperatura superficial mínima diaria de la fachada.

2.3.2 Choque térmico

Como parte del estudio de los efectos asociados a la temperatura, se analiza el choque térmico (Zanoni, 2015). Para ello se determina la frecuencia de ocurrencia de los eventos denominados choque térmico completo y choque térmico atenuado para un año de simulación en todas las fachadas. El primero se configura cuando existe una diferencia de temperatura superficial mayor a 8 C en un intervalo de 1 hora, y el segundo cuando se verifica la misma diferencia de temperatura en un intervalo de 2 h. Las ecuaciones para choque térmico completo y choque térmico atenuado se muestran en (2) y (3), respectivamente.

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-1} \tag{2}$$

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-2} \tag{3}$$

Los resultados se presentan en gráficos de frecuencia anual de ocurrencia, dicha frecuencia se da en valores porcentuales y se calcula a partir de la relación entre el número total de ocurrencias de choques térmicos y el número de horas en un año.

2.3.3 Amplitud térmica ponderada

Para analizar los efectos asociados a la temperatura, se calcula la amplitud térmica ponderada expresada IIT para todas las fachadas, que tiene en cuenta los efectos de los ciclos y los valores alcanzados de temperatura superficial en los sistemas (Nascimento, 2016). El IIT se establece en base a las variaciones de temperatura y su frecuencia de ocurrencia en un cierto intervalo preestablecido. Para ello, el rango de variación de la amplitud térmica se divide en cuatro intervalos iguales, que se representan mediante valores medios de amplitud. El IIT se calcula como un promedio ponderado de los valores de las frecuencias verificadas para el clima de Brasilia en un intervalo de tiempo. Para presentar los resultados se calculó el IIT para un intervalo de 1 año.

La Tabla 4 muestra los cuatro intervalos iguales en los que se distribuyen los rangos de variación de la amplitud térmica (Nascimento, 2016), que consideran intervalos inferiores a 11,5C (rango 1) hasta intervalos superiores a 27,7C (pista 4). Finalmente, el Iit se calcula como se muestra en (4).

Tabla 4. Rangos de amplitud térmica considerados para el cálculo de Iit.

Rango	$\Delta T(^{\circ}C)$	ΔT medio($^{\circ}C$)
4	>27.7	31.8
3	19.7 a 27.7	23.7
2	11.5 a 19.6	15.6
1	< 11.5	7.5

$$I_{it} = \sum \frac{\Delta T_{\text{medio}} \times f_n}{f_{\text{total}}} \quad (4)$$

Donde I_{it} es el índice de intensidad de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), $[\Delta T]_{\text{mean}}$ es la amplitud de temperatura promedio del rango de ocurrencia ($^{\circ}\text{C}$), f_n es la frecuencia de ocurrencia del rango “n” de ΔT y f_{total} es la frecuencia de todas las ocurrencias de los cuatro rangos de estudio en el año, es decir, $f_{\text{total}}=365$.

2.3.4 Lluvia dirigida

El estudio de la lluvia dirigida se realiza mediante el método de cuantificación WUFI, en el que se obtienen datos horarios con un total de 8760 horas de precipitación, velocidad y dirección del viento para alimentar las simulaciones informáticas (Zanoni, 2015). A partir de esto, la intensidad de la lluvia dirigida se calcula en (5).

$$R_{wdr} = R_2 \cdot R_h \cdot V \cdot \cos(D - \theta) \quad (5)$$

Donde R_{wdr} es la Intensidad de la lluvia dirigida (mm/h); R_h es la Precipitación sobre una superficie horizontal (mm); R_2 es el Coeficiente en función de la ubicación en la fachada (s/m); V es el promedio horario de la velocidad del viento a 10 m de altura (m/s); D es la dirección del viento (ángulo desde el norte); θ Orientación de la fachada: ángulo entre el Norte y la dirección normal al muro.

El valor de R_2 , en la metodología de cuantificación WUFI, depende de la altura del edificio y de la ubicación del área de estudio de la fachada como se muestra en la Tabla 5. En este caso, el valor adoptado es 0.2 correspondiente a edificios altos, parte superior mayor de 20 metros. Como datos de salida de la simulación se obtienen los valores de precipitación incidente en las fachadas y se calcula el valor acumulado anual en l/m^2 de lluvia dirigida

Tabla 5. Valores tabulados de R_2 en la metodología de cuantificación WUFI.

Altura	R2
Edificio pequeño, altura hasta 10 metros	0,07
Edificio alto, parte baja hasta 10 metros	0,05
Edificio alto, parte media de 10 a 20 metros	0,1
Edificio alto, parte alta mayor de 20 metros	0,2

3. RESULTADOS

3.1 Radiación total, temperatura superficial máxima y amplitud térmica máxima.

Los resultados de la radiación incidente total y las amplitudes térmicas superficiales máximas absolutas, calculadas como se muestra en (1), de las fachadas Norte de las ocho zonas se muestran en la Figura 2. Se observa que los valores más altos de amplitud térmica ocurren para la zona Z6 ($38,15^{\circ}\text{C}$) seguido de la zona Z2 ($37,5^{\circ}\text{C}$) y Z1 ($37,15^{\circ}\text{C}$), el valor más bajo se encuentra en Z8 ($22,64^{\circ}\text{C}$) y las demás zonas tienen valores intermedios. En cuanto a la incidencia de la radiación solar, Z4 presenta el valor más alto ($1.014.409 \text{ W/m}^2$) seguido de Z6 (995.347 W/m^2), mientras que

Z8 presenta el valor de incidencia de radiación más bajo (743.527 W/m²). Además, se observa que la incidencia de la radiación solar está asociada a la ganancia de temperatura en cada fachada, principalmente en las zonas Z8 y Z6, a excepción de la zona Z4, que presenta la mayor incidencia de radiación y la tercera menor térmica. amplitud.

En cuanto a la radiación total, las zonas Z4 y Z6 son críticas y la Z8 tiene condiciones de exposición más leves, a pesar de estar representada por la ciudad de Belém-Pa ubicada cerca del ecuador. Este resultado se obtiene porque la radiación solar que incide sobre la fachada es solo una parte de la radiación solar global horizontal (formada por las componentes directa, difusa y reflejada) (Silva, 2011) dependiente, por tanto, de la orientación y pendiente de la fachada.

La temperatura superficial y la amplitud térmica en la superficie, al ser el resultado de la interacción entre la radiación solar y el aumento de la temperatura del aire a lo largo del día, son mejores indicadores de las variaciones higrotérmicas que la radiación solar total incidente (Zanoni, 2015). En este caso, Z6 y Z7 son zonas críticas, ya que presentan mayor amplitud térmica (Figura 2) y mayor temperatura superficial (Figura 3) durante todo el año, respectivamente.

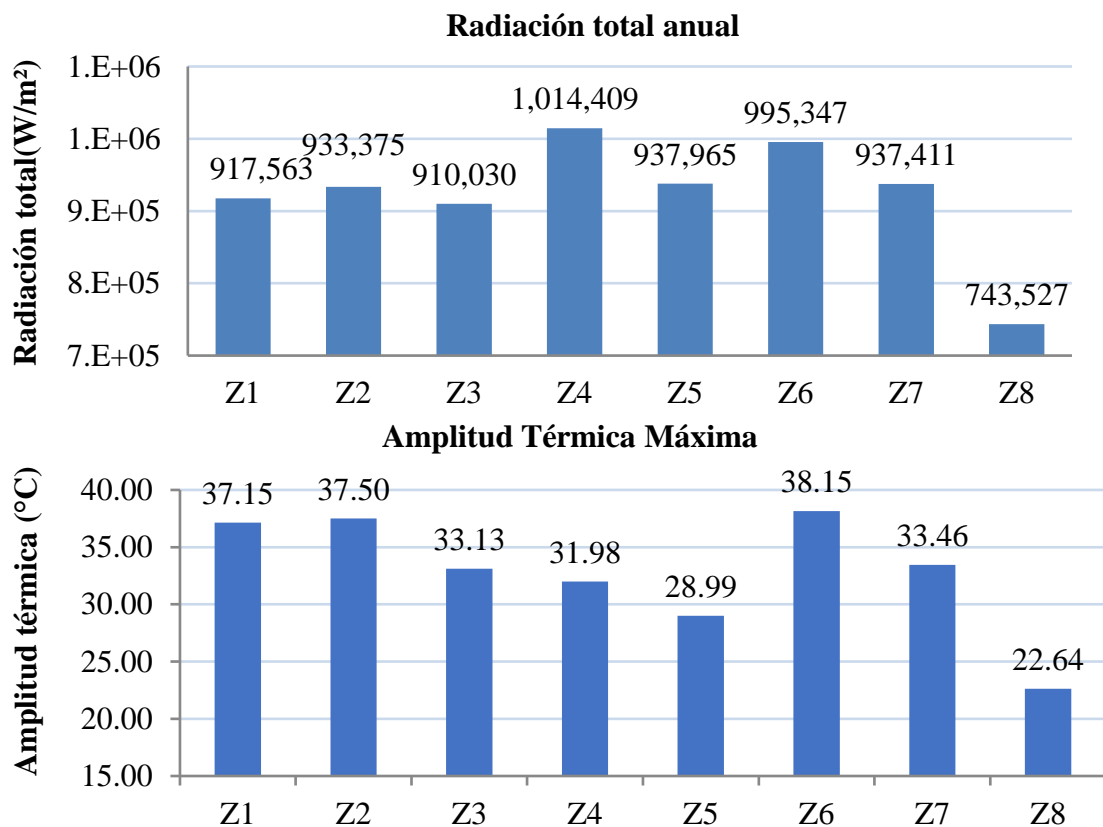


Figura 2. Radiación acumulada total y amplitud térmica máxima en un año de simulación.

Los resultados de temperaturas máximas y mínimas anuales para cada una de las fachadas se muestran en la Figura 3. Se observa que las temperaturas mínimas, que se dan cuando no hay incidencia de radiación en la fachada, presentan grandes diferencias entre ellas. Z2, Z1 y Z3 tienen los valores de temperatura más bajos 2,99°C, 5,48°C y 6,98°C, respectivamente. Por su parte, Z8, a pesar de tener una menor incidencia de radiación total en la fachada, tiene una temperatura mínima más alta (22,07°C) y un valor de temperatura máxima más bajo (46,16°C), lo que es consistente con amplitudes térmicas reducidas, como se muestra en la Figura 2. En este caso, se destaca que la temperatura superficial está ligada no solo a la incidencia de la radiación en la fachada, sino también a la temperatura del aire (ASHRAE, 2009; Lamberts et al., 2011).

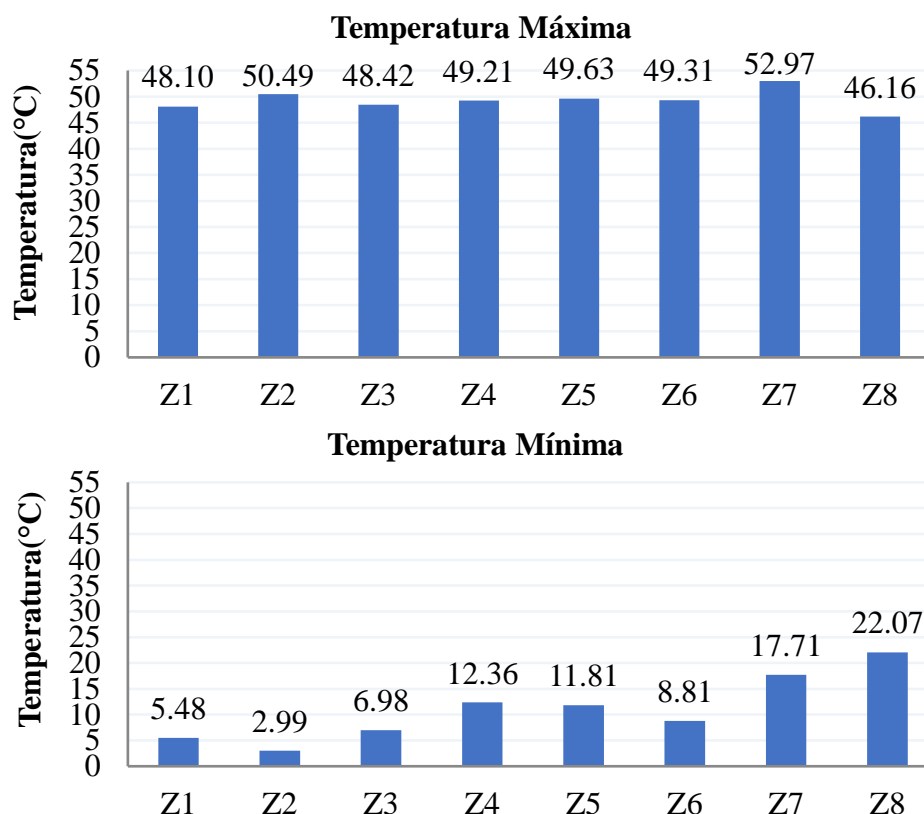


Figura 3. Temperatura superficial máxima y mínima absoluta en un año de simulación para cada zona bioclimática.

3.2 Choque térmico

En cuanto a los resultados de choque térmico, la Figura 4 muestra las frecuencias de ocurrencia de choques completos para todas las fachadas. La frecuencia más alta se destaca en la zona Z6, en la que el 1,59 % de las medidas se caracterizan como choques térmicos completos, seguida de Z1 (0,92 %) y Z4 (0,79 %). Las zonas Z5 y Z7 tuvieron las frecuencias más bajas 0,16% y 0,19%, respectivamente.

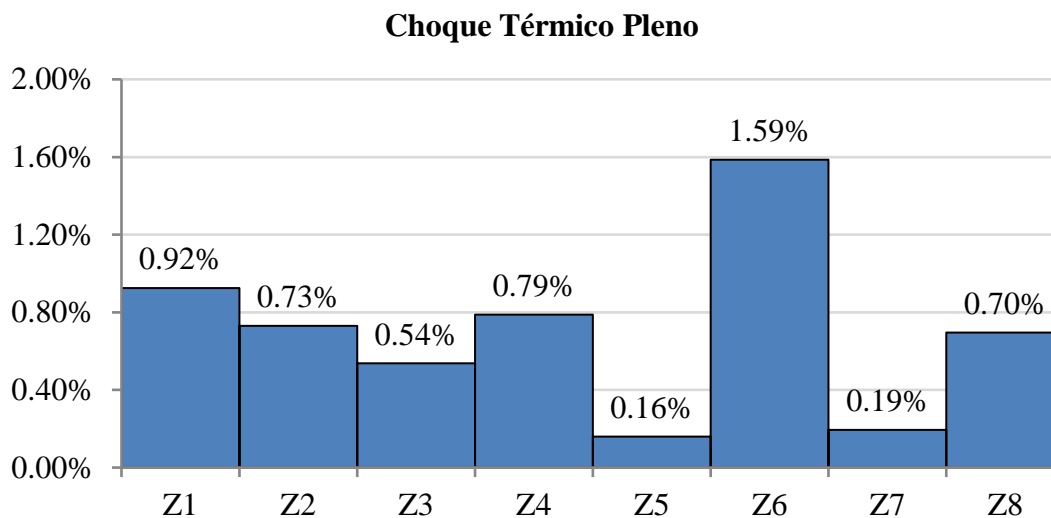


Figura 4. Frecuencia de ocurrencia de choque térmico completo para un año de simulación.

Los picos de choques completos se concentran en los meses de mayo a julio, según el Cuadro 6, que muestra la distribución mensual del número de choques. A lo largo de un año, es posible verificar en qué mes se presenta el mayor número de choques térmicos para cada zona aislada. Así, Z1 y Z5 tienen sus respectivos picos de choque térmico completo en julio, Z3, Z4, Z6 y Z7 en junio y Z2 y Z8 en mayo. En las zonas 1 a 7, los choques térmicos disminuyen de octubre a marzo, llegando a cero en uno o más meses de este período. Sin embargo, esto no ocurre en el Z8, que presenta los eventos de choque térmico mejor repartidos a lo largo del año.

Tabla 6. Número de eventos mensuales completos de choque térmico durante un año de simulación.

Choque Térmico Completo													
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	suma
Z1	1	1	1	9	14	18	25	9	1	1	0	1	81
Z2	0	1	0	4	21	10	7	12	7	0	0	2	64
Z3	1	0	0	1	6	25	14	0	0	0	0	0	47
Z4	1	1	0	4	17	23	19	0	0	1	0	3	69
Z5	0	0	0	0	1	5	6	1	1	0	0	0	14
Z6	4	1	3	10	13	53	38	12	0	0	1	4	139
Z7	0	1	3	3	2	6	2	0	0	0	0	0	17
Z8	5	5	6	7	10	5	2	3	1	4	5	8	61

La frecuencia de ocurrencia de choques atenuados se muestra en la Figura 5. Z6 presenta la mayor ocurrencia con 13.65%, seguida de Z4 con 10.88%. Z8, Z5 y Z2 presentan las frecuencias más bajas, siendo estas del 2,84%, 3,35% y 4,95%, respectivamente. Tenga en cuenta que en el Z6 hay aproximadamente 5 veces más golpes atenuados en comparación con el Z8. Z4 y Z1 también muestran valores de alta frecuencia (10,88% y 10,31%, respectivamente) seguidos de Z3 y Z7 (8,75% y 8,60%).

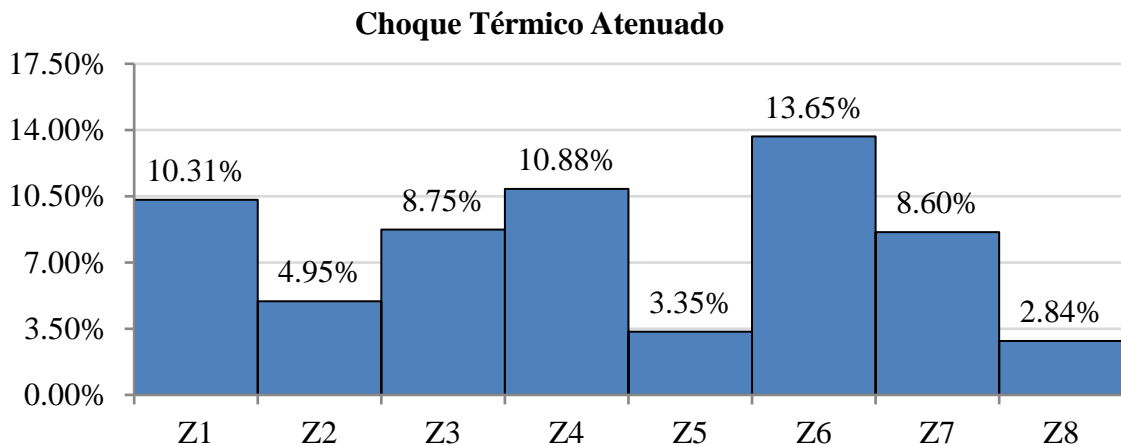


Figura 5. Frecuencia de ocurrencia de choque térmico atenuado para un año de simulación.

Al realizar la distribución de estos eventos en el año, se observa que ocurren de mayo a agosto, como se muestra en la Tabla 6. Solo Z5 presenta meses sin ocurrencia de choques térmicos (noviembre y diciembre). Z2 y Z8 tuvieron su pico en mayo, Z4 y Z6 en junio, Z1, Z5 y Z7 en julio y Z3 en agosto. Hay una mejor distribución de ocurrencias a lo largo del año en Z8, donde varía del 12 de septiembre al 32 de mayo, mientras que en otras áreas hay una mayor variación entre los meses de menor y mayor ocurrencia, como en Z6, que tiene menor ocurrencia en noviembre con 14 eventos y mayor en junio con 211.

Tabla 7. Número de eventos de choque térmico atenuados mensuales durante un año de simulación.

Choque térmico atenuado													
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	suma
Z1	13	24	64	112	146	103	190	114	78	46	4	9	903
Z2	6	14	39	65	85	38	50	62	44	27	1	3	434
Z3	6	25	72	106	127	115	76	128	73	28	5	5	766
Z4	6	18	52	120	148	182	177	143	71	16	10	10	953
Z5	2	1	5	32	46	56	82	44	22	3	0	0	293
Z6	27	33	76	121	175	211	207	170	84	56	14	22	1196
Z7	10	11	32	80	155	145	157	114	40	3	2	4	753
Z8	18	15	22	29	32	20	29	19	12	18	14	21	249

Las zonas con mayor frecuencia de choque térmico tienen condiciones críticas de exposición y aquellas con menor frecuencia tienen condiciones más suaves. Se destaca la zona Z6, que presentó la frecuencia más alta tanto para choques térmicos completos como atenuados. Finalmente, la zona Z5 presentó frecuencias reducidas en los dos tipos de choques considerados y la Z8 menor frecuencia para choques atenuados.

3.3 Amplitud térmica ponderada

La Figura 6 muestra los resultados del IIT para todas las fachadas correspondientes a cada zona bioclimática. Los resultados tienen en cuenta los valores de variación de temperatura para un año de simulación. Como se observó en los resultados de máxima amplitud térmica y choque térmico, la zona Z6 presentó valores críticos (22,55) en cuanto a la acción de los agentes de temperatura. Asimismo, las zonas Z8 y Z5 presentaron los valores de IIT más bajos (16,53 y 16,55). Z2, Z4 y Z7 también presentaron valores altos con respecto a los demás y Z3 y Z1 presentaron valores intermedios.

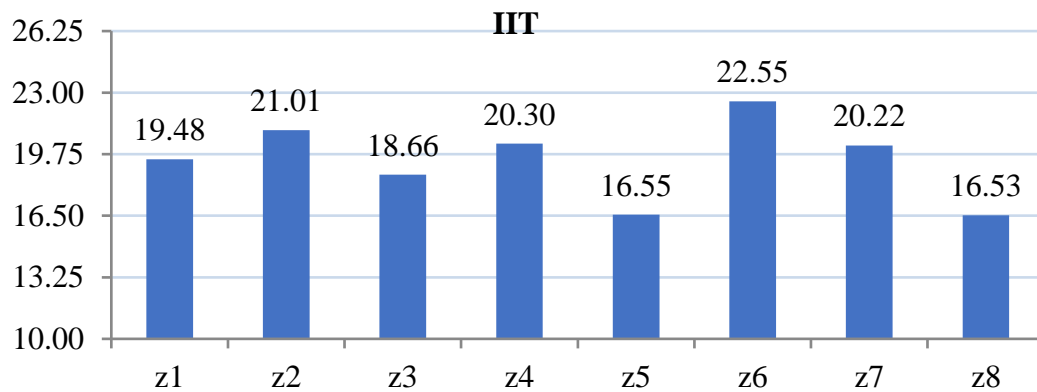


Figura 6. Valores de IIT para todas las zonas bioclimáticas.

Las variaciones térmicas en las fachadas son causantes de deformaciones en el sistema de revestimiento e inducen esfuerzos de fatiga como consecuencia de su característica cíclica. Así, las variaciones térmicas están relacionadas con anomalías en los revestimientos de fachada, especialmente en lo que se refiere al desprendimiento y agrietamiento de la cerámica (Silva, 2014; Souza, 2016). El IIT se muestra como un valor de referencia a nivel de comparación entre ciudades, y que demuestra la severidad de la exposición al agente de degradación térmica. Por lo tanto, valores más altos representan una mayor exposición y un mayor potencial de degradación y disminución de la vida útil.

Los valores de IIT se consideraron adecuados cuando se relacionaron con la degradación de las fachadas (Nascimento, 2016) y, con base en ellos, se estableció un Ranking sobre la exposición de las fachadas a la temperatura, clasificadas según su severidad. Entonces, en orden descendente, las áreas más graves fueron: Z6>Z2>Z4>Z7>Z1>Z3>Z5>Z8.

3.4 Lluvia dirigida:

Se analizó la precipitación dirigida en términos de incidencia de precipitación total anual (l/m^2), Figura 7, para las mismas fachadas norte, con el fin de completar el análisis de los agentes de degradación realizado. Obsérvese que la zona Z8 es crítica para este caso ($113,15 l/m^2$) con un valor unas 6 veces superior a la zona de menor incidencia Z5 ($18,2 l/m^2$), en contraste con los resultados anteriores. Las zonas Z4 ($100,12 l/m^2$) y Z3 ($71,72 l/m^2$) también muestran valores altos en comparación con las demás. Finalmente, Z1 ($52,19 l/m^2$) y Z6 ($59,67 l/m^2$) presentan valores intermedios mientras que Z2 ($35,57 l/m^2$) y Z7 ($30,57 l/m^2$) presentan valores de incidencia de lluvia inferiores.

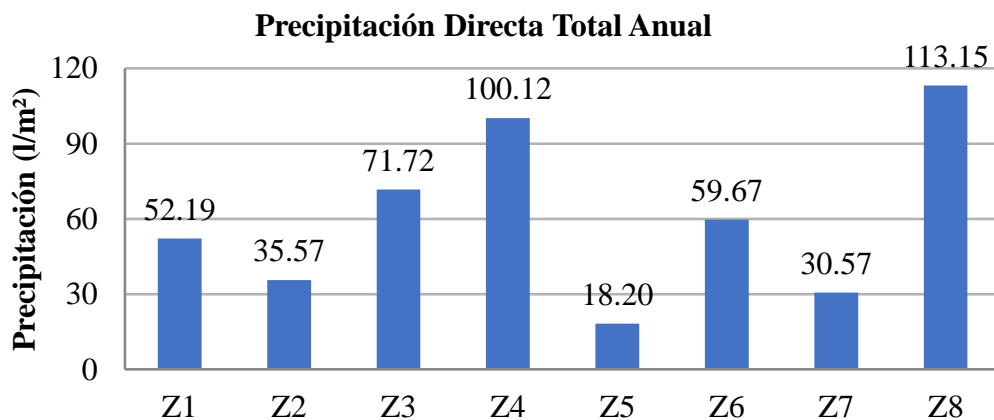


Figura 7. Valores acumulados de lluvia dirigida para una no simulación en todas las zonas bioclimáticas

Cabe destacar que la lluvia dirigida es el resultado de la acción de los vientos sobre la precipitación (Freitas, 2011; Zanoni, 2015), por tanto, está condicionada a la velocidad y dirección de los vientos. Para las ciudades de Brasilia y Goiania, la orientación con mayor precipitación es al Norte (Zanoni et al., 2014; Zanoni et al., 2018; Andrade et al., 2021; Melo y Carasek, 2011) mientras que para Curitiba es la orientación Este (Batista et al., 2017) y para Florianópolis es la orientación Sur (Giango et al., 2010; Giongo, 2007). En este caso, los resultados presentados no representan necesariamente la orientación de exposición crítica a la humedad de la lluvia, sino la orientación adoptada como referencia, al Norte.

4. CONCLUSIÓN

Se propuso investigar la acción de los agentes de degradación asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en las fachadas de edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. En este contexto, es posible identificar áreas que presentan condiciones críticas de exposición a agentes de degradación como una forma de contribuir al conocimiento de las diferentes condiciones que desencadenan el proceso de degradación en Brasil. De esta forma, fue posible identificar los siguientes comportamientos:

- Zona Z6, representada por la ciudad de Goiânia-GO, proporciona condiciones críticas de exposición en relación a la amplitud térmica, choque térmico atenuado y completo e índice de intensidad de temperatura;
- La zona Z8, representada por la ciudad de Belém-PA, a pesar de presentar una condición de exposición más leve para los agentes asociados a la temperatura (radiación solar, amplitud térmica, choque térmico atenuado e índice de intensidad de temperatura) es crítica para la exposición al agua lluvia dirigida.
- Las zonas Z1, Z2, Z3, Z5 y Z7, representadas por las ciudades de Curitiba-PR, Santa Maria-RS, Florianópolis-SC, Niterói-RJ y Picos-PI, respectivamente, presentaron valores de incidencia de radiación total anual sobre la fachada Norte similar. Sin embargo, Z1 y Z2 presentan amplitudes térmicas altas en comparación con los demás.
- Con relación a la Lluvia Directa, las fachadas Norte de las zonas Z8 y Z4 (Brasília-DF) presentaron mayor exposición considerando los valores de precipitación anual y la Zona Z5 presentó la condición de exposición más leve.
- Se concluye que las fachadas norte analizadas en las 8 zonas bioclimáticas brasileñas tienen diferentes condiciones de exposición a agentes asociados a la temperatura y lluvia dirigida. Estos afectan a la durabilidad del edificio, ya que la sinergia de los agentes de degradación que actúan sobre las fachadas acelera la degradación, comprometiendo su rendimiento y afectando su vida útil. Además, como aporte, el estudio brinda un ranking relativo a la severidad de exposición a la temperatura, por lo tanto, con mayor potencial de degradación y disminución de la vida útil. En orden descendente, las áreas más expuestas: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8, o por las ciudades de Goiânia-Santa Maria-Brasília-Picos-Curitiba-Florianópolis-Niterói-Belém.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al PECC (Programa de Postgrado en Estructuras y Construcción Civil) de la Universidad de Brasilia, y al DMMPROJECT (Degradación: Mesaurament and Modelling). Este estudio fue financiado en parte por la Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior - Brasil (CAPES) - Código financiero 001, por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y por el Decano Académico de Estudios de Posgrado


(DPG) de la Universidad de Brasilia (UnB).

6. REFERENCIAS

- Andrade, D., Kardec, T., Bauer, E.(2021). “*Sinergia dos agentes higrotérmicos na degradação de fachadas*”. In: XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das construções, 2021, Fortaleza.
- ASHRAE - American Society of Heating (2009), *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Inc. Handbook 2009 -Fundamentals. Atlanta, artigo 2SPPC1017, pp. 199–212, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, A. S. (2013), “*Estudo Numérico-Computacional e Analítico do Choque Térmico em Fachadas de Edificações*”. Dissertação (Mestrado). Masters Thesis, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Batista, G., Rufato, R., Miranda, D., Giordano, D. Medeiros, M. (2017), “*Análise do índice de chuva dirigida em cidades do Paraná e sua importância no projeto de fachadas de edifícios*”. IN: Simpósio Paranaense de Patologia das construções, 2017.
- Bauer, E., Aidar, L. A. G., Piña, A. B. S. (2018), “*Estudo do transporte de água oriunda da chuva dirigida em fachadas – aplicação com o emprego da simulação higrotérmica*”. IN: Construção, 2018, Brasília, Livro de Atas.
- Bauer, E., Castro, E. K., Silva, M. N. B. (2015), “*Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília*”. *Cerâmica*, v. 62, p. 151-159. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581786>
- Bauer, E., Mota, L., Souza, J. (2021). “*Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil*”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 23-43. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400557>
- Bauer, E., Nascimento, M. L. M., Castro, E. K.(2015), “*Parâmetros e ensaios físicos de materiais e componentes da fachada. Relatório interno*” – Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) – UnB/ENC.
- Bezerra, L. M., Uchôa, J. C., Araújo, J. A., Bonilla, J. (2018), “*Experimental and Numerical Investigation of Fatigue in Base-Rendering Mortar Used in Façades Undergoing Thermal Cycles*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 30. n. 8. pp.1-14. [https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002319](https://doi.org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002319)
- Dornelles, K. A., Roriz, M. (2007), “*A ilusão das cores na identificação da absorção solar de superfícies opacas*”. In: IX ENCAC E VII ELACAC, 2007, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: ANTAC.
- Freitas, A. S. S. L. A. (2011), “*Avaliação do comportamento hidrotérmico de revestimentos exteriores de fachadas devido à ação da chuva incidente*”, Masters Thesis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 170 p.
- Gaspar, P., Brito, J. (2005), “*Mapping Defect Sensitivity in External Mortar Renders*”. *Journal of Construction and Building Materials*, v. 19(8), p. 571-578, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.014>
- Giongo, M. (2007), “*Análise do nível de exposição das edificações à chuva dirigida para Florianópolis*”. Masters Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- Giango, M., Padaratz, I. J., Lamberts, R. (2011), “*Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semi-empíricos*”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 1, p. 7-23. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000100002>
- Lamberts, R. (2011). “*Desempenho térmico de edificações. Apostila da disciplina ECV 5161 do*

- LABEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações”. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- Melo, C. M., Carasek, H. (2011), “Índices de chuva dirigida direcional e análise do nível de umedecimento em fachadas de edifício multipavimentos em Goiânia, GO”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 3, p. 23-37. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000300003>
- Moscoso, Y. F. M. (2013), “Estudo numérico e experimental de tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica”. Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília. p. 142.
- Nascimento, M. (2016), “Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios”, Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.p. 127
- Nascimento, M. L. M., Bauer, E., de Souza, J. S. (2016), “Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation”. *Journal of Building Phatology and Rehabilitation* 1, 5. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0006-5>.
- Pacheco, C. P., Vieira, G. L. (2017), “Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico”. *Cerâmica*, v. 63, p. 432-445. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682156>
- Roriz, M. (2012), “Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC”. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP.
- Saraiva, A. G. (1998), “Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada”. Masters Thesis. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 164 p.
- Silva, A., Dias, J. L., Gaspar, P. L., Brito, J. (2011), “Service life prediction models for exterior stone cladding”. *Building Research and Information*, 39(6): 637-653, 2011. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.617095>
- Silva, M. N. B. (2000), “Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânicas em Sistemas de Revestimento de Fachadas”. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 218 p.
- Souza, J. (2019), “Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios”, Doctoral thesis, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, p. 101.
- Uchôa, J. C. B., Bezerra, L. M., Brito, M. A. N., Júnior, A. C. M., Silva, W. T. M. (2016), “análise de tensões internas em sistemas de revestimentos Cerâmicos de fachadas no distrito federal devido a Carregamentos térmicos utilizando modelagem MEF 3D”. IN: XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília, DF, Brazil, November 6-9.
- Zanoni, V. (2015), “Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília”. Doctorial Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. p. 253.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2014), “Chuva dirigida: um estudo da iso 15927-3 no contexto brasileiro. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, Maceió-AL.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2018), “Avaliação de métodos para quantificação de chuva dirigida nas fachadas das edificações”. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 122-132, jun. 2018. ISSN 1980-6809. <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650260>

Evaluación no destructiva de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reuso en su restauración

A. Hernández Oroza^{1*} , E. Berreo Alayo¹, R. Expósito Mendez¹

*Autor de Contacto: ahernandez@proyectos.ohc.cu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

Recepción: 01/02/2022 | Aceptación: 08/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar, a través de clasificación visual y ensayos no destructivos, el estado de conservación de 32 vigas de madera para su reuso como proyecto de restauración de un edificio histórico. Para esto se realizaron mediciones del contenido de humedad, penetrómetro, estimación del módulo de elasticidad y tensión de rotura mediante velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados mostraron que el 66% de las vigas presentaban afectación por pudrición, desfibramiento y fisuración. Los ensayos realizados a las vigas deterioradas permitieron determinar que, para una confiabilidad del 95%, de las restantes 21 vigas era posible reutilizar 17 de ellas con una densidad promedio de 0.4 g/cm³.

Palabras clave: restauración; vigas de madera; deterioro; penetrómetro; ultrasonido.

Citar como: Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R. (2022), “Evaluación no destructiva del estado de conservación de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reuso en su restauración”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 263 – 278, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

¹ Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor A. H. Oroza contribuyó con el diseño de la investigación (100%), la redacción del texto (60%), la discusión de resultados (100%) y revisión (100%). El autor E. Berreo Alayo contribuyó con redacción del texto (40%) y el procesamiento de los datos obtenidos (100%). El autor R. Expósito Mendez contribuyó con la actividad de registro de las mediciones (100%). Todos los autores contribuyeron de forma equitativa en la ejecución de las mediciones y el desarrollo 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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Non-destructive evaluation of the wooden beams of the Narciso López building in the Historic Center of Havana for reuse in its restoration

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate, through visual classification and non-destructive tests, the state of conservation of 32 wooden beams for reuse as a restoration project for a historic building. For this, measurements of the moisture content, penetrometer, estimation of the modulus of elasticity and breaking stress by ultrasonic pulse velocity were made. The results showed that 66% of the beams were affected by rot, defibration and cracking. The tests carried out on the deteriorated beams made it possible to determine that, for a reliability of 95%, of the remaining 21 beams it was possible to reuse 17 of them with an average density of 0.4 g/cm³.

Keywords: restoration; wooden beams; decay; penetrometer; ultrasound.

Avaliação não destrutiva das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração

RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar, por meio de classificação visual e ensaios não destrutivos, o estado de conservação de 32 vigas de madeira para reaproveitamento como projeto de restauração de um edifício histórico. Para isso, foram feitas medições do teor de umidade, penetrômetro, estimativa do módulo de elasticidade e tensão de ruptura por velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que 66% das vigas foram afetadas por apodrecimento, desfibramento e fissuração. Os ensaios realizados nas vigas deterioradas permitiram determinar que, para uma fiabilidade de 95%, das restantes 21 vigas foi possível reaproveitar 17 delas com densidade média de 0,4 g/cm³.

Palavras-chave: restauração; vigas de madeira; deterioração; penetrômetro; ultrassom.

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 empleo de la madera como material de construcción tiene sus orígenes desde los primeros asentamientos humanos, con la conformación de chozas primitivas. Las bondades de sus propiedades en cuanto a manipulación, durabilidad, dureza, resistencia y color, han propiciado el uso de la misma a lo largo de la historia de la humanidad, tanto para la creación artística como constructiva. En las edificaciones en donde el empleo de este material tiene un desempeño estructural, el cual influye en la seguridad de la obra y sus explotadores, se hace necesario realizar evaluaciones periódicas de la integridad de la madera mediante inspecciones y ensayos (Szostak et al., 2020; Zielińska and Rucka, 2021). Factores como la baja disponibilidad mundial de madera sólida, la disminución de los diámetros de los troncos de los árboles de especies maderables que los hace menos aprovechables industrialmente, unido a la necesidad de preservar la memoria histórica de las edificaciones, ha conllevado al desarrollo de normativas, metodologías y técnicas de ensayos para la evaluación de la calidad y estado de conservación de este material (Documento Básico SE-M, 2019; Manavella et al., 2019; Salazar et al., 2018; UNE 56544, 2011).

Con el propósito de que la intervención sobre las estructuras de madera sean lo menos invasiva posibles, la aplicación de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistografía, extracción de tornillo o penetrómetro, permiten obtener a partir de mediciones *in-situ* resultados fiables para la determinación del estado de conservación de elementos estructurales de madera. La aplicación de los mismos posibilita la estimación de parámetros como la densidad, la tensión de rotura y el módulo de elasticidad para su reaprovechamiento o sustitución de acuerdo con los requisitos del proyecto. Aunque el empleo de estas técnicas ofrece ventajas en cuanto a seguridad de clasificación basado en sus resultados, la evaluación visual de la madera, como criterio de aceptación, se mantiene en la actualidad como el método más empleado, debido fundamentalmente a su bajo coste en comparación con el empleo de equipamientos, y la facilidad que ofrece la madera de mostrar sus características y lesiones en la superficie de la misma.

Las edificaciones del Centro Histórico de La Habana construidas antes del siglo XX tienen en común el empleo de madera como elemento estructural de soporte de entresijos y forjados, en donde se combinan los sistemas de viga y tabazón, con viga y losa por tabla. Estas maderas, en el momento que fueron aserradas para su explotación como elemento estructural, no se clasificaron por sus características debido a la inexistencia de normativas al respecto, por lo que criterios como la anchura de los anillos de crecimiento, fendas, bolsas de resina, gemas, deformaciones y alteraciones biológicas no fueron tenidas en cuenta de forma normalizada. En este sentido, las normativas vigentes (DIN EN 338:2016-07, 2016; ISO 9709:2018, 2018; UNE 56544, 2011), establecen criterios de rechazo que conllevarían a la sustitución total o parcial de elementos de madera que, después de haber sido empleados por más de un siglo, han demostrado su durabilidad y capacidad portante, debido a que están concebidas para madera nueva.

Sin embargo, cuando se trata de reutilización de elementos de madera estructural para rehabilitación y conservación patrimonial, es importante el empleo combinado de los criterios visuales y analíticos, puesto que estos últimos pueden aportar mejores criterios de acierto en comparación con la clasificación visual, según fue demostrado por (Rello et al., 2007) en donde obtuvieron que mediante VPU se puede alcanzar hasta 72% con respecto al 53% de acierto en calidad de madera. Los materiales de construcción con los años de explotación sufren diferentes formas de deterioro que, en el caso de la madera, se inicia fundamentalmente por la presencia de humedad debido a que es un material higroscópico y poroso. En este sentido, diversos investigadores (Bratasz et al., 2010; Sotomayor Castellanos, 2015) han demostrado la influencia del contenido de agua en la conservación de la madera y sus propiedades. De acuerdo con (Arriaga et al., 2006), el módulo de elasticidad puede variar en 2% para rangos de humedad entre 5% y 30%.

Basado en las consideraciones antes expuestas y la necesidad de evaluar la posible reutilización de vigas de madera en edificaciones históricas, este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de la evaluación del estado de conservación de las vigas de madera del soporte del primer nivel entre los ejes 5-6:A-C del edificio Narciso López (Figuras 1 y 2), ubicado en el Centro Histórico de La Habana. El mismo fue construido en el año 1858 y cuenta de 4 niveles, de los cuales la planta baja y entresuelo son de muros de piedra, mientras los superiores son de mampuesto. Los entresijos están soportados por vigas de madera de pino (*pinus sp.*). Los procesos de restauración iniciados en el año 2019 requirieron de un diagnóstico patológico, por primera vez desde la construcción del inmueble, para determinar su posible aprovechamiento y de esta manera preservar, en la medida de lo posible, los elementos originales de la edificación.



Figura 1. Edificio Narciso López.

Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

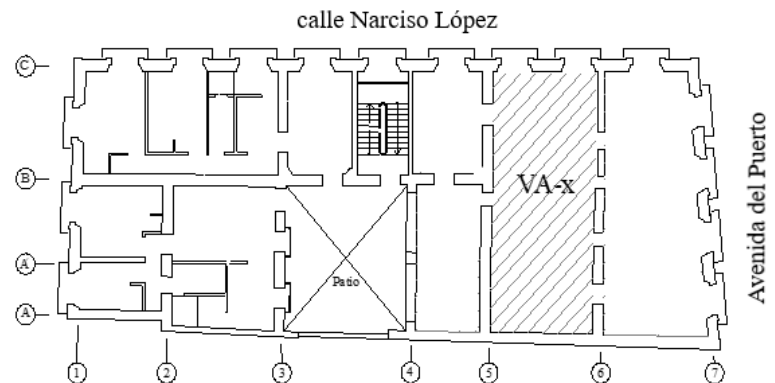


Figura 2. Vista en planta del primer nivel del edificio. Señalizado de la zona de estudio. Elaboración propia

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se inició con el retiro del piso y el desmonte de todas las vigas. Esto posibilita la inspección detallada por todas las caras (Figuras 3 y 4), fundamentalmente en la zona de las cabezas, las cuales, al estar empotradas en los muros, presentan mayores deterioros por pudrición debido a la acumulación de humedad en el interior de la fognadura (Figuras 5 y 6). Esta primera etapa permite registrar la posición, longitud, dirección y sentido de cada fisura, grieta, pudrición y/o desfibramiento presentes en las vigas, para lo cual se tomó como referencia la distancia de la lesión con respecto a la cabeza (Figura 7). Adicionalmente se identificaron las zonas de ensayo que cuentan con las condiciones idóneas para la realización de las mediciones. En áreas en donde existan fisuraciones o deterioros por distintas formas de pudrición (parda, blanda, etc.) no es posible realizar mediciones debido a que no se logra una correcta transmisión o confinamiento de la señal, desde el emisor al receptor, o los resultados obtenidos están alterados por la presencia de películas microbianas que afectan la composición física-química de la madera, degradando su estructura y densidad. Por su parte las técnicas de impacto o penetración, presentan como inconveniente que no deben ser aplicadas sobre superficies irregulares que influyan en el momento de impacto de la broca, ya sea por deformación de la misma, alteración en el ángulo de entrada o carencia de madera para ofrecer un valor de densidad representativo de las propiedades reales del elemento estructural. Para la preparación de las zonas de ensayo se seleccionaron dos secciones por cada viga, libres de lesiones en la superficie.

Posteriormente se procedió a la identificación de cada viga mediante el código del local (VA-x), en donde la x representa un número consecutivo, iniciado desde el 1. El local cuenta con un total de 32 vigas de madera, las cuales apoyan entre los ejes 5-6. Para determinar las dimensiones se empleó una cinta métrica, y se registraron las medidas de ancho, peralte y longitud (Tabla 1). A las cabezas de las vigas se les identificó con las letras A y B (Figura 8).



Figura 3. Etapa de inspección detallada en viga montada sobre burros de madera



Figura 4. Inspección y clasificación visual de vigas desmontadas



Figura 5. Estado de las cabezas de las vigas

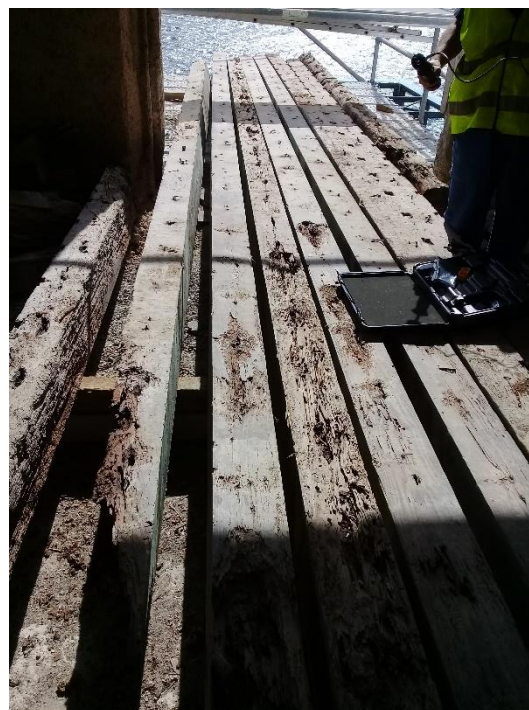


Figura 6. Vigas desmontadas con diferentes manifestaciones patológicas



Figura 7. Medición con cinta métrica de la sección de viga afectada



Figura 8. Identificación de las vigas de madera

2.1 Ensayos no destructivos aplicados

Los ensayos aplicados consistieron en la estimación de la densidad (ρ), tensión de rotura (f_k) y módulo de elasticidad dinámico (MED), mediante la combinación de las técnicas de penetrómetro y VPU. Para ambas es necesario realizar ajustes con respecto al contenido de humedad, para lo cual se toma como referencia el valor de 12%. En el caso del penetrómetro, para la determinación de la densidad a 12% de humedad, la ecuación de ajuste empleada fue la de (Kuklík, 2007):

$$\rho_{12} = -0.027102 * t_{p,12} + 0.727987 \quad (1)$$

$$t_{p,12} = t_p(1 - 0.007\Delta w) \quad (2)$$

$$\Delta w = w - 12 \quad (3)$$

Dónde:

ρ_{12} = densidad de la madera al 12% de humedad; g/cm^3

$t_{p,12}$ = profundidad de penetración en la madera con 12% de humedad; mm

t_p = profundidad de penetración en la madera ensayada; mm

w = humedad de la madera en el momento de la medición; %

Para la medición de VPU el equipo empleado fue Proceq Pundit Lab⁺, con transductores cónicos de 54KHz (Figura 9). Los mismos se colocaron en sentido perpendicular a las fibras (Figura 10) y se programó en el equipo la distancia entre ellos, para cada viga. Se realizó el ajuste a 12% de humedad mediante la siguiente ecuación (Liñán et al., 2011):

$$VPU_{12} = 27.5(w - 12) + VPU \quad (4)$$

Dónde:

VPU_{12} = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

w = humedad de la madera en el momento de la medición; %

VPU = velocidad de pulso ultrasónico medida; m/s



Figura 9. Aplicación de ensayos de VPU en vigas de madera



Figura 10. Esquema de aplicación de VPU perpendicular a la fibra

Basado en los mismos criterios, se calculó la tensión básica de rotura (f_k) y el límite de determinación del estado de conservación de las vigas de madera:

$$f_k = (0.212VPU_{12} - 183.09) * 1/10 \quad (5)$$

Dónde:

f_k = tensión de rotura; MPa

VPU_{12} = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

A partir de las mediciones de VPU y los valores obtenidos de estimación de densidad, se calcularon los módulos dinámicos aplicando la ecuación empleada por (Alquicira and Castellanos, 2021; Ettelaei et al., 2018):

$$MED = \rho * VPU_{12}^2 \quad (6)$$

Dónde:

MED= módulo de elasticidad dinámico; N/m²

ρ = densidad; Kg/m³

VPU_{12}^2 = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

Para la medición de la humedad en las vigas de madera se empleó el termo-higrómetro Delmhorst's TotalCheck (Figura 11).



Figura 11. Medición de humedad superficial con equipo termo-higrómetro Delmhorst's TotalCheck

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación visual

De las 32 vigas inspeccionadas, once de ellas no mostraron ningún tipo de lesión (Tabla 1). De acuerdo con los requisitos de clasificación visual de la norma (UNE 56544, 2011), 4 vigas categorizaron como ME-1 y 7 como ME-2 (Tabla 2). El resto de las vigas clasifican como Rechazo considerando los daños recurrentes de grietas y fisuras longitudinales, pudrición y desfibramiento, fundamentalmente en la zona de las cabezas hasta una distancia aproximada de 40 cm. Sin embargo, al tratarse de un proyecto de rehabilitación que pretende emplear las vigas originales, a excepción de la VA-18, todas requieren de ser reevaluadas mediante los ensayos propuestos.

Tabla 1. Resultados de la inspección realizada a las vigas de madera.

ID	Ancho (cm)	Peralto (cm)	Longitud (cm)	Lesiones
VA-1	15	19.5	312	Astillado por la CI a 70 cm del cabezal A.
VA-2	16	20	320	Fisuras longitudinales discontinuas en la mitad del peralto de la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 250 cm.
VA-3	18	20	309	Fisuras discontinuas longitudinales en la mitad del peralto.
VA-4	17.5	20	295	Desfibrada en la AS en toda la longitud de la viga.
VA-5	17.5	20	310	Grietas y fisuras longitudinales discontinuas por CL, en la mitad del peralto. Desfibrada por CS desde el cabezal B hasta una longitud de 70 cm.
VA-6	14	20	304	Fisura en la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 20 cm en la mitad del peralto.
VA-7	12.5	20	304	Fisura longitudinal en la mitad del peralto de ambas caras laterales, desde el cabezal A hasta una longitud de 90 cm.
VA-8	12.5	20	310	Fisuras longitudinales desde el cabezal B hasta una longitud de 60 cm en la mitad superior de la CL. Pudrición por CL desde el cabezal A, hasta una longitud de 70 cm.
VA-9	14.5	20	309	No se observaron lesiones.
VA-10	15.5	20	310	Fisura longitudinal en la mitad superior de la CL, en toda la longitud. Desfibrado superficial por CL, a 90 cm del cabezal B.
VA-11	17.5	21	310	No se observaron lesiones.
VA-12	17	20	310	
VA-13	11.5	21.5	476	Desfibrada por la CS afectando 5 cm del ancho de la CL y 2-3 cm del peralto.
VA-14	11.5	21.5	475	No se observaron lesiones.
VA-15	11.5	21.5	472	Fisura longitudinal en la mitad del peralto de la CL en toda la longitud.
VA-16	12	22	480	No se observaron lesiones.
VA-17	13	21.5	480	Desfibrado por CS a 30 cm del cabezal B, hasta una longitud de 60 cm.
VA-19	13	21	480	No se observaron lesiones.
VA-18	Pudrición generalizada			
VA-20	12	20	480	No se observaron lesiones.
VA-21	11.5	20	480	
VA-22	11.5	21	480	Grietas y fisuras longitudinales discontinuas por CL en toda la luz de la viga en la mitad inferior del peralto. Desfibrada por CS a partir de 160 cm del cabezal A, hasta una longitud de 200 cm.

VA-23	15	20	299	Desfibrado superficial en el tercio superior de la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 40 cm.
VA-24	14	19.5	297	No se observaron lesiones.
VA-25	15.5	20	306	
VA-26	18	20	305	Desfibrado en toda la arista superior de la CL.
VA-27	17	20	305	Fisuras longitudinales por CS en toda la luz.
VA-28	15	20	310	Ablandamiento y desfibrado por la CS, en toda la longitud. Fisuras longitudinales discontinuas por la CL.
VA-29	14.5	20	310	Desfibrado en cabezal A y B por la CS hasta una longitud de 40 cm respectivamente.
VA-30	14.5	20	310	Desfibrado por CS afectando 3 cm del peralto en toda la longitud.
VA-31	16.5	20	362	Astillada por CI a 60 cm del cabezal B. Desfibrado superficial en AS de la CL.
VA-32	11	21	361	No se observaron lesiones.
Abreviaturas empleadas: CI: cara inferior CL: cara lateral CS: cara superior AS: arista superior				

Tabla 2. Clasificación visual de las vigas de madera.

Calidad visual (UNE 56544, 2011)	Cantidad de vigas
ME-1	4
ME-2	7
Rechazo	21

La inspección visual permitió determinar la extensión del daño en la superficie, pero no su profundidad en la masa de la madera, excepto en los casos donde la pudrición sea muy avanzada. Las lesiones por pudrición o profundidad de grietas hacia el interior de las vigas, puede conllevar a la pérdida de la capacidad portante del elemento y provocar su fractura.

De acuerdo con (Nuere, 2007), en los casos en los cuales el deterioro puede conllevar a la invalidación del elemento para cumplir la función estructural que tiene asignada en el conjunto, debe tomarse la decisión si bien sustituir o reforzar las vigas. La aplicación de estos criterios a cada viga dependerá del análisis combinado de las lesiones visibles, y los resultados obtenidos mediante las técnicas no destructivas (Tabla 3). El retiro de un elemento de madera requerirá necesariamente su sustitución por otro de similares dimensiones que cumpla los requerimientos de clasificación visual y clase resistente, para no afectar los requisitos de carga por proyecto.

3.2 Aplicación de ensayos no destructivos

Para la realización de los ensayos de penetrómetro y VPU se prepararon dos puntos en cada viga. En cada uno se registraron 5 lecturas, para un total de 10 resultados por cada elemento. En la figura 12 se muestra un resumen de valores en algunas de las vigas ensayadas.

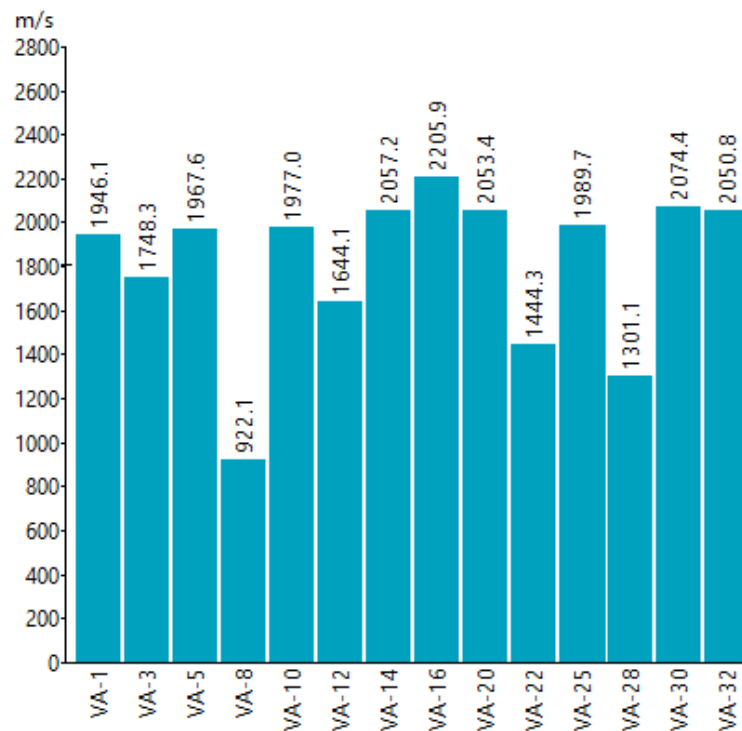


Figura 12. Resumen de mediciones de VPU en un punto de ensayo para las vigas de madera. Datos extraídos del software Proceq PunditLink

Los criterios para la estimación del deterioro de la madera basado en los resultados de VPU se plantearon de acuerdo con (Liñán et al., 2011), en el que se establece que:

VPU > 1400 m/s: madera sana (MS)

VPU < 1400 m/s: madera deteriorada (MD)

Tabla 3. Resultados promedios de las mediciones y cálculos aplicados.

ID	w (%)	TP (mm)	TP ₁₂ (mm)	p ₁₂ (g/cm ³)	VPU ₁₂ (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)	Criterio
VA-1	13.3	10.5	10.4	0.45	2011.58	24.34	1804.33	MS
VA-2	12.3	10.0	10.0	0.46	2143.33	27.13	2101.57	MS
VA-3	11.8	12.0	12.0	0.40	2020.32	24.52	1642.40	MS
VA-4	14.3	12.0	11.8	0.41	1972.75	23.51	1587.83	MS
VA-5	17.9	9.5	9.1	0.48	1930.15	22.61	1792.52	MS
VA-6	13.7	9.5	9.4	0.47	2108.75	26.40	2105.94	MS
VA-7	15.8	9.5	9.2	0.48	2565.00	36.07	3140.70	MS
VA-8	15.2	10.5	10.3	0.45	921.20	1.22	381.70	MD
VA-9	19.9	11.3	10.7	0.44	2147.25	27.21	2022.57	MS
VA-10	12.2	10.7	10.7	0.44	1865.80	21.25	1526.17	MS
VA-11	14.6	9.0	8.8	0.49	2043.00	25.00	2038.96	MS
VA-12	18.1	12.3	11.8	0.41	1733.55	18.44	1228.72	MS
VA-13	17.8	10.7	10.3	0.45	2375.50	32.05	2538.05	MS
VA-14	14.9	12.3	12.1	0.40	2101.05	26.23	1771.94	MS
VA-15	15.6	11.7	11.4	0.42	2019.70	24.51	1708.71	MS
VA-16	19.3	11.0	10.4	0.45	2336.25	31.22	2429.38	MS

VA-17	15.7	12.0	11.7	0.41	2273.55	29.89	2125.43	MS
VA-18	Viga descartada por avanzado deterioro							
VA-19	17.0	10.3	9.9	0.46	2126.00	26.76	2072.85	MS
VA-20	15.4	10.3	10.1	0.46	2066.10	25.49	1944.34	MS
VA-21	15.6	11.0	10.7	0.44	2126.20	26.77	1977.26	MS
VA-22	14.4	10.7	10.5	0.44	1485.10	13.18	976.75	MS
VA-23	14.4	10.0	9.8	0.46	2165.10	27.59	2163.45	MS
VA-24	13.1	9.3	9.2	0.48	1995.55	24.00	1903.02	MS
VA-25	12.0	10.7	10.7	0.44	1996.20	24.01	1745.33	MS
VA-26	13.2	10.0	9.9	0.46	2073.90	25.66	1975.23	MS
VA-27	16.2	10.7	10.4	0.45	2015.70	24.42	1814.24	MS
VA-28	18.4	12.7	12.1	0.40	1397.50	11.32	779.66	MD
VA-29	15.7	11.7	11.4	0.42	1960.35	23.25	1610.61	MS
VA-30	14.5	11.7	11.5	0.42	2193.75	28.20	2004.15	MS
VA-31	14.6	12.0	11.8	0.41	1914.30	22.27	1497.63	MS
VA-32	13.9	9.7	9.6	0.47	1960.15	23.25	1800.43	MS

En los resultados de VPU obtenidos solo dos vigas (VA-8 y VA-28) muestran valores inferiores al límite establecido de 1400 m/s, siendo clasificadas como “madera deteriorada”. Esto puede deberse a que la infestación por hongos de la pudrición, ablandamiento y desfibramiento en la madera se han extendido hacia el interior de las vigas, lo cual se refleja en el resultado de la velocidad de transmisión de la onda entre los transductores. Con los años de explotación del inmueble no es posible determinar las causas por las cuales estas vigas sufrieron un deterioro considerablemente superior al resto. Es posible que su ubicación coincidiera con la de zonas húmedas como baños o cocinas, aunque los contenidos de humedad registrados no muestran valores extremos que sustenten esta hipótesis. El análisis estadístico de los datos (Tabla 4), en el que se excluyeron a las vigas VA-8 y VA-28, muestran una dispersión para VPU inferior al 10%, con una confiabilidad del 95%, por lo que para el resto de los valores se acepta la población de datos obtenida.

Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados obtenidos en las vigas clasificadas como MS.

Parámetros estadísticos	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	VPU, 12 (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)
Xmed	15.1	10.8	0.4	2059.5	25.4	1898.3
sd	2.1	1.0	0.0	197.3	4.2	400.3
CV(%)	14.0	9.2	5.8	9.6	16.5	21.1
Min.	11.8	9.0	0.4	1485.1	13.2	976.8
Max.	19.9	12.3	0.5	2565.0	36.1	3140.7

La densidad mínima de las vigas fue de 0.4 g/cm³. Esto corresponde con una clasificación de clase resistente superior a C35, de acuerdo con (Documento Básico SE-M, 2019). Los resultados de VPU inferiores a 1400 m/s obtenidos para la VA-8 y VA-28 infieren que los deterioros por pudrición y fisuras se extienden hacia el interior del elemento. Sin embargo, sus resultados de profundidad de penetración no fueron significativos en comparación con las restantes vigas.

Esto demuestra que la estimación del estado de conservación de la madera basados en la densidad calculada mediante penetrómetro, puede conllevar a falsos positivos si no se combina con otras técnicas de medición. La dureza de la madera en el punto de impacto de la aguja, puede resultar en un valor elevado que no refleja el deterioro en el interior del material. En la Figura 13 se muestra

el análisis general de resultados que correlacionan el contenido de humedad/penetración/densidad calculada. En los casos de la VA-9 y VA-16 se identifica como alcanzan un valor de penetración ≥ 11.0 mm para una humedad próxima a 20%, en lo cual se esperaría un ablandamiento de la madera que resultase en mayor penetración, como sucede con la VA-28. La comparación de contenidos de humedad entre estas vigas es muy similar pero con resultados opuestos. En el caso de VA-9 y VA-16 no presentan lesión alguna y mantuvieron una VPU superior a 2000 m/s, mientras que en la VA-28 se confirmó el avance de las lesiones hacia el interior de la viga con resultados de VPU inferiores a 1400 m/s.

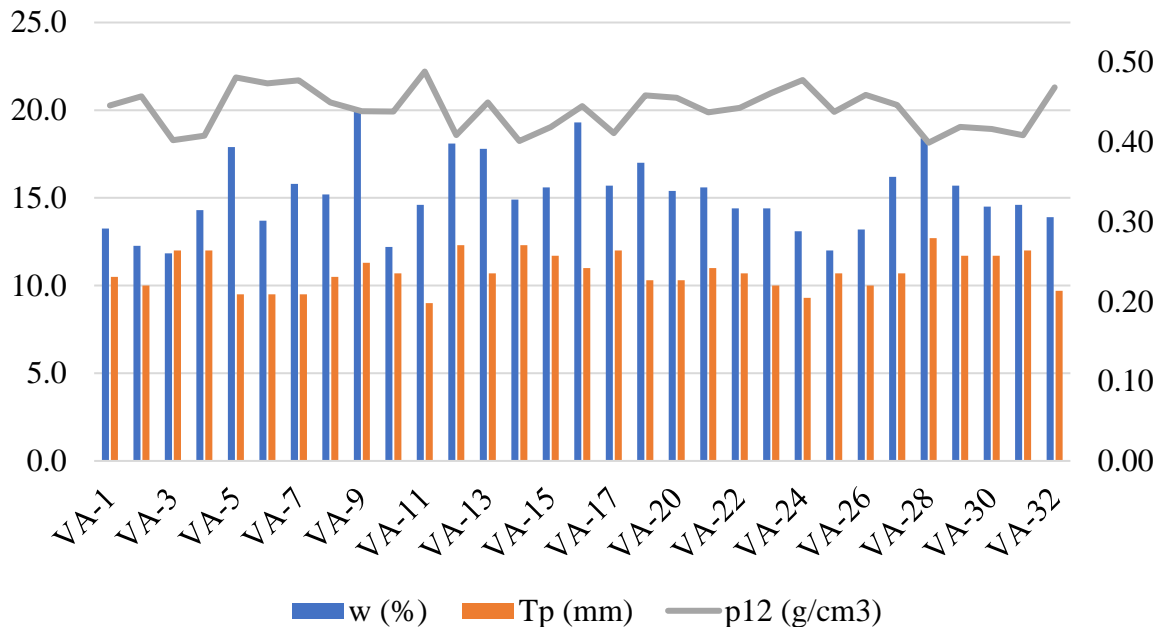


Figura 13. Relación de resultados de contenido de humedad, penetrómetro y densidad calculada a 12% para todas las vigas de madera estudiadas

Del total de mediciones de VPU realizadas, el 82% fluctuó en una profundidad de penetración entre 9.0 mm y 12.0 mm. En el análisis gráfico (Figura 14) se aprecia como el conjunto mayoritario de resultados ocupa el rango comprendido entre 1800 m/s y 2400 m/s para el intervalo antes mencionado. La gráfica permitió identificar a la viga VA-22 como una variable distante de la media poblacional con un resultado de VPU= 1485.10 m/s. Si se toma en consideración la desviación estándar calculada y las lesiones presentes en la viga, sería razonable por cuestiones de seguridad estructural sustituirla por una nueva. Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas para estimación de la f_k y el MED muestran una elevada correlación entre ellos (Figura 15)., caracterizando a las vigas en clase estructural ME-2 (UNE 56544, 2011), sobre las cuales deben aplicarse todas las acciones de restauración y consolidación necesarias para su reúso.

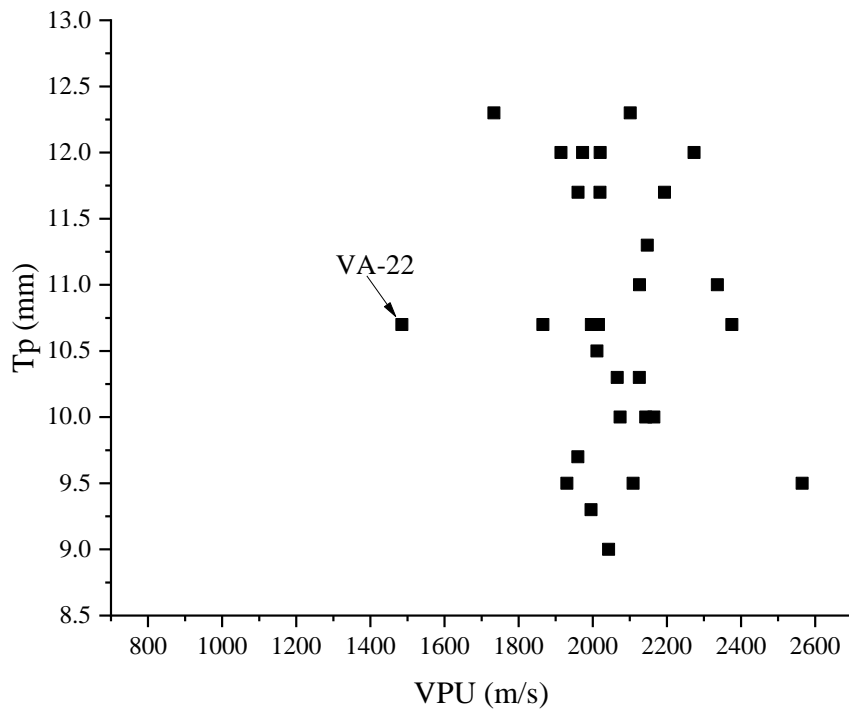


Figura 14. Relación de resultados de VPU vs Tp para las vigas evaluadas como Madera Sana

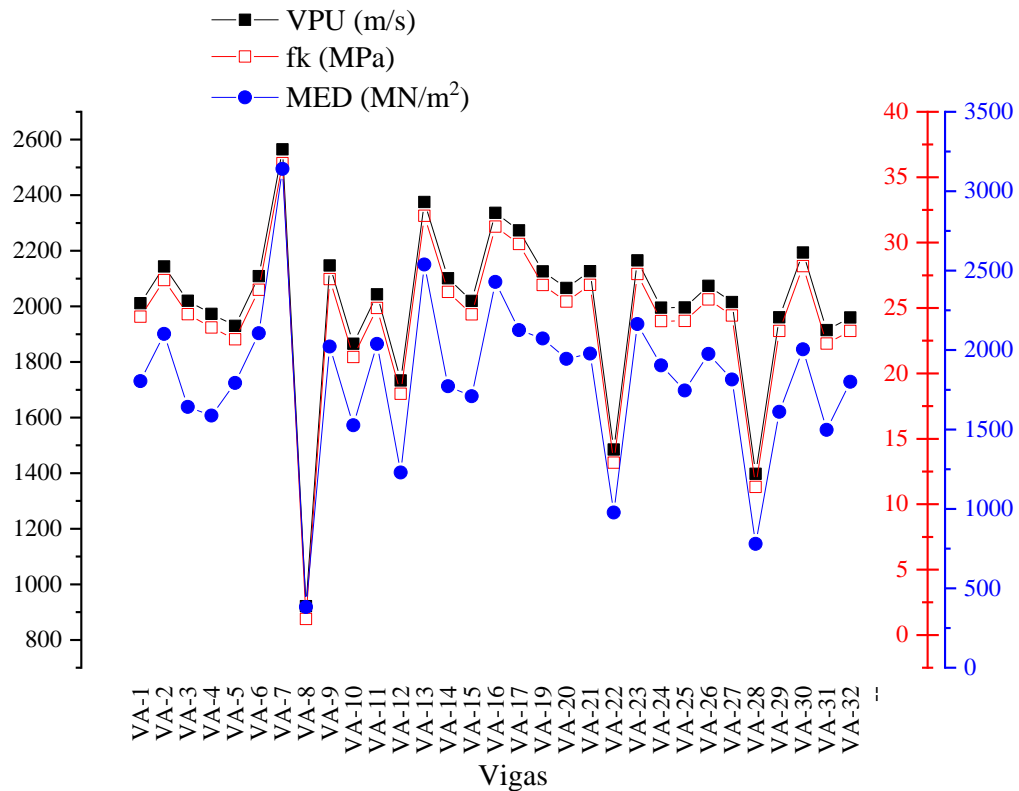


Figura 15. Correlación de resultados obtenidos de VPU, fk y MED para las vigas de madera

4. CONCLUSIONES

De las 32 vigas diagnosticadas para evaluar su posible reúso como madera estructural en la rehabilitación del inmueble, se arriba a las siguientes conclusiones:

Las lesiones más recurrentes encontradas durante la inspección visual fueron el deterioro de las cabezas por exceso de humedad en la fagonadura, debido al desarrollo de hongos de la pudrición, además de fisuras y grietas discontinuas en las caras y aristas. Entre las técnicas más comunes de restauración y reforzamiento para estos tipos de deterioro están el uso de casquillos y ménsulas metálicas para garantizar la sujeción de las vigas en los puntos de apoyo. Decapado o cepillado de las caras y aristas hasta alcanzar una superficie con la menor cantidad posible de lesiones. Las fisuras por su parte pueden ser selladas mediante resinas, o a partir de la preparación de un engrudo de cola de carpintero mezclada con aserrín, fumigación y tratamiento con productos biocidas, y finalmente el recálculo estructural para las nuevas dimensiones de las vigas.

El estudio combinado de evaluación visual y ensayos no destructivos permitió identificar que las vigas VA-8, VA-18, VA-22 y VA-28, deben ser sustituidas por presentar avanzadas lesiones y deficiente densidad para ser reusadas como elemento estructural.

La normativa vigente de clasificación visual de madera serrada para uso estructural es muy conservadora en lo relativo a deterioros, lo que puede resultar en la sustitución total de elementos de madera antiguos. En proyectos de rehabilitación y conservación de bienes patrimoniales, es más efectiva la evaluación del estado de conservación mediante la aplicación de ensayos de medición sobre las piezas de madera.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la técnica de VPU mostró resultados más acertados con respecto a la condición de densidad de la madera en comparación con la técnica de penetrómetro, en la cual, mediante las ecuaciones empleadas, no se reflejaron afectaciones en las densidades para variaciones de contenido de humedad entre 11.8% y 19.9%.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por el Grupo Inversionista Avenida del Puerto, perteneciente a la Dirección de Inversiones de la OHCH bajo contrato S-No. 4DG /2021 al Contrato 6DG/2020. Los autores desean agradecer el apoyo de los técnicos Lázaro Y. Martínez García y Raúl de Jesús Expósito Mendez, así como reconocer la labor y colaboración de los obreros y carpinteros de la obra.

6. REFERENCIAS

- Alquicira, I. M., Castellanos, J. R. S. (2021), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de Pinus pseudostrobus*. Madera y Bosques, 27(3): e2732235-e2732235. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J. I. (2006), *Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*. Holz als Roh-und Werkstoff, 64(5): 357-362. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0100-5>
- Bratasz, L., Rachwal, B., Kozłowski, A., Kozłowski, R. (2010). *Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects, Wood science for conservation of cultural heritage-Braga 2008 : proceedings of the international conference held by Cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 November 2008. - (Proceedings e report ; 67)*. Firenze University Press, Firenze.

- DIN EN 338:2016-07. (2016). *Structural timber - Strength classes*. Germany. <https://dx.doi.org/10.31030/2463437>.
- Documento Básico SE-M. (2019). *Seguridad Estructural. Madera*.
- Ettelaei, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z., Ebrahimi, G., (2018), *Prediction of Modulus of Elasticity of Poplar Wood Using Ultrasonic Technique by Applying Empirical Correction Factors*. Measurement. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.076>
- ISO 9709:2018. (2018). *ISO 9709:2018(en) Structural timber — Visual strength grading — Basic principles*.
- Kuklík, P. (2007). *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Manavella, R. D., Guillaumet, A. A., Filippetti, M. C., Meyer, L. C. (2019), "*Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa*". 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.
- Nuere, E., (2007), *Madera, en restauración y rehabilitación*. Informes de la Construcción, 59(506): 123-130.
- Rello, L. A., Barra, R. D., Sanz, M. C., Fernández, A. L., Sánchez, M. T. L., Basterra, A. (2007). *Clasificación de madera estructural de P. pinaster Ait. Mediante ultrasonidos*, Congreso Iberoamericano de productos forestales - Iberomadera, Buenos Aires, Argentina.
- Salazar, D. V., Delgado, J. C., Yoza, L. Y., Mallque, M. A. (2018), *Propuesta metodológica para la evaluación de estructuras de madera en monumentos históricos – Caso Hotel El Comercio*. Revista Forestal del Perú, 33(2): 117-132. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i2.1225>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de Pinus douglasiana, en relación a su contenido de humedad*. Revista de Ciencia y Tecnología(23): 25-30.
- Szostak, B., Trochonowicz, M., Kowalczyk, M. (2020), *Determination of the strength parameters of pinewood based on the non-destructive sclerometric test with a wood hammer*. Civil and Environmental Engineering Reports, 30(1): 43-52. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0004>
- UNE 56544. (2011). *Norma Española UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Madrid. España.
- Zielińska, M., Rucka, M. (2021), "*Using the ultrasonic tomography method to study the condition of wooden beams from historical building*". 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC). International Institute for Conservation of Historic And Artistic Works.

Degradación del hormigón mediante la formación de ácido sulfúrico biogénico en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales

G. Coni^{1*} , A. Tafuri² , A. Costa¹ , G. Sakuma¹ 

*Autor de Contacto: conigabriella@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.571>

Recepción: 06/12/2021 | Aceptación: 04/03/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio realizado en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales luego de que se observara una severa degradación. El ataque del ácido sulfúrico biogénico en los sistemas de alcantarillado es ampliamente estudiado en la literatura, sin embargo, los datos sobre situaciones reales de construcciones aún son bastante limitados. Se realizaron análisis de concentración de H₂S en el aire, profundidad de carbonatación, ensayo de resistencia a la compresión, petrografía, SEM/EDS, XRD y determinaciones químicas en núcleos de hormigón extraídos por encima del nivel del efluente. Los productos identificados en la superficie fueron gipsita, jarosita, hidróxido ferroso, cloruro ferroso y posiblemente hisingerita. Los resultados demuestran la presencia en la superficie de ambos productos de la disolución de pasta de cemento y barras de acero de 16 mm ubicadas en la región atacada.

Palabras clave: ataque de ácido sulfúrico biogénico; degradación; hormigón armado.

Citar como: Coni, G., Tafuri, A., Costa, A., Sakuma, G. (2022), "Degradación del hormigón mediante la formación de ácido sulfúrico biogénico en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales", Revista ALCONPAT, 12 (2022), pp. 279 – 295, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.571>

¹ Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A (Sabesp), São Paulo, State of São Paulo, Brasil.

² Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo la autora Gabriella contribuyó con las actividades: recolección de datos 25%, redacción de trabajos 35%, discusión de resultados 30%, autora Amanda contribuyó recopilación de datos 25%, redacción de trabajos 35%, discusión de resultados 30%, autor Guilherme contribuyó recopilación de datos 25 %, redacción de artículos 15 %, discusión de resultados 20 % y la autora Adriana contribuyó con la recopilación de datos 25 %, redacción de artículos 15 %, discusión de resultados 20 %.

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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Concrete degradation by the formation of biogenic sulfuric acid in a Sewage Pumping Station

ABSTRACT

This work presents the study carried out in a Sewage Pumping Station after severe degradation was observed. The attack by biogenic sulfuric acid in sanitary sewage systems is widely studied in the literature, however, data on real work situations are still quite limited. Analyzes of the concentration of H₂S in the air, carbonation depth, compressive strength test, petrography, SEM/EDS, XRD and chemical determinations were carried out in concrete cores extracted above the effluent level. The products identified on the surface were Gypsum, Jarosite, Ferrous Hydroxide, Ferrous Chloride and possibly Hisingerite. The results demonstrate the presence on the surface of both products from the dissolution of cement paste and 16 mm steel bars located in the attacked region.

Keywords: biogenic sulfuric acid attack; degradation; reinforced concrete.

Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo realizado em uma Estação Elevatória de Esgoto após ser constatado severa degradação. O ataque por ácido sulfúrico biogênico em sistemas de esgoto sanitário é amplamente estudado na literatura, entretanto, dados em situações reais de obra ainda são bastante limitados. Foram realizadas análises da concentração de H₂S no ar, profundidade de carbonatação, ensaio de resistência à compressão, petrografia, MEV/EDS, DRX e determinações químicas em testemunhos de concreto extraídos acima do nível do efluente. Os produtos identificados na superfície foram Gipsita, Jarosita, Hidróxido Ferroso, Cloreto Ferroso e possivelmente Hisingerita. Os resultados demonstram a presença na superfície tanto de produtos oriundos da dissolução da pasta cimentícia quanto das barras de aço de 16 mm localizadas na região atacada.

Palavras-chave: ataque por ácido sulfúrico biogênico; degradação; concreto armado.

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 ambiente del alcantarillado sanitario posee un microclima que favorece la formación de ácido sulfúrico biogénico (H_2SO_4) debido a la presencia de bacterias oxidantes y sulfatoreductoras (Estokova et.al., 2012). Este ácido, producido por bacterias oxidantes, es extremadamente agresivo para el hormigón ya que ataca la pasta de cemento, descalcificando los productos de hidratación del cemento, lo que provoca la pérdida de cohesión del hormigón (Wu et.al., 2018).

Otro punto crítico es la reducción del pH del hormigón a un valor extremadamente bajo, alcanzando valores en torno a pH 1-2. En consecuencia, se produce la despasivación del refuerzo y comienza el proceso de oxidación (Estokova et.al., 2012). De esta forma, el ácido produce una acción conjunta de degradación tanto del hormigón como del acero en un corto periodo de tiempo, pudiendo alcanzar tasas de deterioro de 12 mm/año en muchos sistemas de alcantarillado sanitario (Wu et.al., 2018). En el trabajo de Fernandes et.al., (2012) se presentó un sistema de alcantarillado sanitario con 300 km de extensión, el cual sufrió deterioro superficial del hormigón en tan solo 2 años después de su construcción. Actualmente se están estudiando estrategias para mitigar la degradación de la infraestructura de alcantarillado, por ejemplo, el uso de bioconcretos que reducen la cantidad de bacterias sulfurooxidantes (Song et.al., 2021).

El proceso de degradación del hormigón por ácido sulfúrico biogénico, a pesar de ser ampliamente discutido en la literatura, los datos de investigaciones realizadas en situaciones reales de trabajo son aún limitados (O'Connell et.al., 2010; WU et.al., 2020)). De acuerdo con Wu et.al., (2020), las tasas de corrosión obtenidas en estudios de campo y laboratorio generalmente muestran una gran variación y aún es difícil establecer relaciones cuantitativas para ambas situaciones con base en el conocimiento existente. Este trabajo busca, por lo tanto, relatar un estudio de caso realizado en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales perteneciente a la Empresa de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo - SABESP, que presentó severo deterioro con apenas 20 años de construcción y operación. Se espera que los resultados del presente trabajo proporcionen parámetros que ayuden en la validación de estudios realizados a escala de laboratorio y en el desarrollo de estrategias que apunten a incrementar la vida útil de las infraestructuras de saneamiento.

2. FUNDAMENTO TEORICO

El ataque del ácido sulfúrico biogénico empieza con la formación de ácido sulfhídrico acuoso (H_2S) por parte de bacterias anaeróbicas causantes de la desulfatación, denominadas *Desulfovíbrio desulfuricans*, presentes en una de las capas del lodo efluente (Wu et. al., 2018). Estas bacterias, en condiciones anaeróbicas y con una concentración de oxígeno disuelto (OD) inferior a 0,1 mg/L, convierten los compuestos de azufre presentes en el efluente en ácido sulfhídrico acuoso (H_2S) (House y Weiss et al., 2014; Wu et al., 2018).

Parte del sulfuro de hidrógeno acuoso se libera en forma gaseosa como sulfuro de hidrógeno (H_2S) sobre la línea de efluentes. El paso de H_2S (aq) a la fase gas está fuertemente influenciado por el pH del efluente, las condiciones de equilibrio entre la fase gas/líquido, la temperatura y la turbulencia (Wells et.al., 2009; Wu et.al., 2020).

El sulfuro de hidrógeno liberado se condensa en la superficie del hormigón donde es sometido a múltiples etapas de oxidación por parte de microorganismos oxidantes del azufre, como las bacterias aerobias del grupo *Thiobacillus*, que actúan en diferentes rangos de pH, transformándolo en ácido sulfúrico biogénico (House e Weiss, 2014; Monteny et.al., 2000; Wu et.al., 2018).

La colonización de microorganismos en el hormigón depende de la disponibilidad de nutrientes (materia orgánica), la humedad y la reducción del pH. La reducción del pH del hormigón ocurre por carbonatación y por la acidificación de la superficie causada por la liberación de H_2S (g) (Jiang

et al., 2014). Cuando el pH superficial alcanza valores cercanos a 9, el medio ya presenta condiciones suficientes para iniciar la proliferación de bacterias tipo *T. thioparus* (Wu et.al., 2018). La actividad bacteriana es la encargada de regir la disminución paulatina del pH de la superficie del hormigón, alterando simultáneamente las comunidades microbianas actuantes. Las bacterias *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus intermedius* y *Thiobacillus neapolitanus* empiezan a proliferar hasta alcanzar un $\text{pH} \approx 3,0$, luego se produce una disminución de las bacterias previamente colonizadas por lo que se produce una rápida proliferación de la bacteria *Thiobacillus thiooxidans*, cuya presencia se asocia a una corrosión severa del acero (Scrivener y Belie, 2013).

La Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, principal responsable de la alcalinidad ($\text{pH} \approx 13.0$) de la matriz del cemento, es el primer compuesto en reaccionar con el ácido sulfúrico, formando Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La gipsita precipitada puede reaccionar con fases que contienen aluminato para formar Etringita $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (House e Weiss, 2014; Wells et.al., 2009). La formación de Etringita da como resultado tensiones expansivas que comúnmente hacen que el hormigón se agriete y facilitan la penetración del ácido, lo que acelera el proceso de degradación de la estructura (Wu et al., 2018). A partir de pH por debajo de 10,6, la Etringita es inestable y empieza a disolverse (Duchesne y Bertron, 2013). Así, la Etringita es un producto intermedio del ataque ácido, siendo la Gipsita el producto final de la reacción (Davis et.al., 1998). A medida que se agota la reserva de iones de calcio que proporciona a priori la Portlandita, las siguientes reacciones se centran en la descalcificación del silicato de calcio hidratado (C-S-H), principal compuesto responsable de la resistencia mecánica del hormigón. El producto de esta reacción es gel de sílice, un material sin capacidad portante (Monteny et.al., 2000). En resumen, la degradación de la matriz de cemento ocurre en la región no sumergida, empezando desde la superficie y avanzando gradualmente hacia el interior de la estructura.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo presenta el estudio realizado sobre la degradación del hormigón en el pozo húmedo de una Estación de Bombeo de Aguas Residuales perteneciente a la Empresa de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo (SABESP) puesta en funcionamiento en diciembre de 1999. Se realizaron inspecciones internas de la estructura para obtener un registro fotográfico y extracción de muestras de hormigón de la pared del pozo húmedo del Elevador para su análisis.



Figura 1. (a) Vista al interior del pozo húmedo (b) Degradación del hormigón y del acero

La estructura cuenta con dos pozos circulares concéntricos, seco y húmedo, con un diámetro de 25,60 m y 13,70 m, respectivamente. La primera se ejecutó en hormigón armado, con cubierta metálica, y la segunda en hormigón pretensado. El pozo seco es donde se ubican seis juegos de

motobombas y el pozo húmedo, objeto de esta obra, con 18,70 m de altura, es la parte de la estructura que recibe y envía las aguas residuales a la planta de tratamiento.

La inspección de la estructura se realizó en el pozo húmedo (Figura 1a) y restringida al área de gas (sobre el nivel del efluente). En esta región, la superficie del hormigón presentó una condición atípica con capas de hasta 15 cm de espesor con pérdida de consistencia, siendo fácil de remover con el uso de una espátula (Figura 2a). El espesor determinado en el diseño de la pared es de 35cm. El refuerzo pasivo de 16mm se encuentra oxidado (Figura 2b), con pérdida de sección y secciones seccionadas y/o completamente disueltas.



Figura 2. (a) Facilidad de remoción de la capa de hormigón degradado usando una espátula y (b) estiramiento de la disolución del refuerzo.

En el presente estudio se realizaron las siguientes pruebas:

3.1 Concentración de gases

Se realizaron mediciones diarias de concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S), en el área de gas de la estación de bombeo, durante el período 07/02/2020 al 30/11/2020, utilizando el myDataSens H_2S de Microtronics, con capacidad de medición de 0-1000 ppm. El medidor recopila y almacena datos automáticamente cada 5 minutos.

3.2 Análisis del frente de carbonatación

El ensayo cualitativo para determinar el frente de carbonatación del hormigón se realizó utilizando una solución compuesta por fenolftaleína, un indicador ácido/base incoloro que cambia de color a púrpura a pH arriba de 9 (alcalino), denotando la presencia de $Ca(OH)_2$.

3.3 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en cuatro (04) núcleos cilíndricos de hormigón extraídos del muro, según ABNT NBR 7680-1/15, con diámetro nominal de 75mm. El ensayo de compresión de probetas cilíndricas fue realizado de acuerdo con la ABNT NBR 5739/18.

3.4 Prueba petrográfica

El análisis petrográfico se basó en la norma ASTM C 856/2017 - “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”. Dos de los núcleos extraídos se utilizaron para fabricar láminas delgadas con dimensiones de 2,5 cm x 4,0 cm para caracterizar la interfaz entre la región aparentemente sana y la región atacada. Se utilizó un microscopio modelo DM4500 P acoplado a una cámara digital DFC7000 T, ambos de Leica, y una lupa binocular estereoscópica modelo M-8, de Wild. La edición de imágenes se realizó con el software LAS X. En el ensayo se utilizó la técnica fotográfica a través de fotomicrografía para obtener imágenes ampliadas de la

microestructura del material.

3.5 Microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X y determinaciones químicas

En una misma probeta se realizaron análisis en tres capas diferentes: una capa exterior, obtenida por raspado del hormigón sin consistencia, una capa intermedia y una capa interior, aparentemente sana. Para microscopía electrónica de barrido, la muestra raspada se secó en un desecador sellado a temperatura ambiente durante 4 días. Los fragmentos secos se montaron cuidadosamente en el portamuestras de aluminio, con la ayuda de cinta de carbón y cinta de aluminio. Las muestras intermedias y más internas se rompieron con la ayuda de un martillo, en cada extremo del núcleo de hormigón. Los fragmentos fueron recolectados, cuidadosamente seleccionados y rápidamente montados en un portamuestras de aluminio, con la ayuda de cinta de carbono y cinta de aluminio y cubiertos con una fina capa de oro-paladio.

Para el análisis de difracción de rayos X, una alícuota de la muestra raspada se secó a (45 ± 5) °C durante 7 días, mientras que los fragmentos de las muestras intermedias y más internas se trituraron en un mortero para obtener el mortero, luego se molieron en un mortero de porcelana hasta pasar completamente por un tamiz ABNT N° 200 (75 μm). Se utilizó el equipo de difracción de rayos X EMPYREAN modelo Panalytical, operando en radiación $K\alpha$ de cobre a 45 kV – 40 mA y escaneando a $2^\circ 2\theta/\text{min}$. La identificación de compuestos se realizó utilizando el software X-pert HighScore Plus de Panalytical (versión 4.9) y patrones de difracción proporcionados por el ICDD (International Center for Diffraction Data) con actualización hasta 2017. Las determinaciones químicas se realizaron únicamente sobre el material raspado, así: Determinación de residuo insoluble en agua en ácido, con base en las directrices generales de la norma ASTM C114-18 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" y ABNT NBR 13810:1997 "Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama". Determinación de sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe), magnesio (Mg) y calcio (Ca), solubles en agua y ácido, con base en los lineamientos generales de la norma ASTM C114-18 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" y ABNT NBR 13810:1997 "Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama". Determinación de iones de cloruro e iones de sulfato solubles, de acuerdo con las directrices generales de la NBR 9917:2009 "Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis".

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Concentración de gases

La concentración de ácido sulfhídrico presente en el aire tiende a aumentar con el aumento de la temperatura, como se observa en la Figura 3. El aumento de la temperatura reduce la solubilidad del H_2S (aq) en las aguas residuales y favorece la liberación en forma gaseosa con el ácido sulfhídrico (Wu et al., 2018). Sin embargo, la temperatura no es el único factor que influye en la concentración, ya que la liberación de H_2S (g) dentro de la bomba también está influenciada por la turbulencia, que está directamente relacionada con el número de bombas en funcionamiento en el momento de la medición.

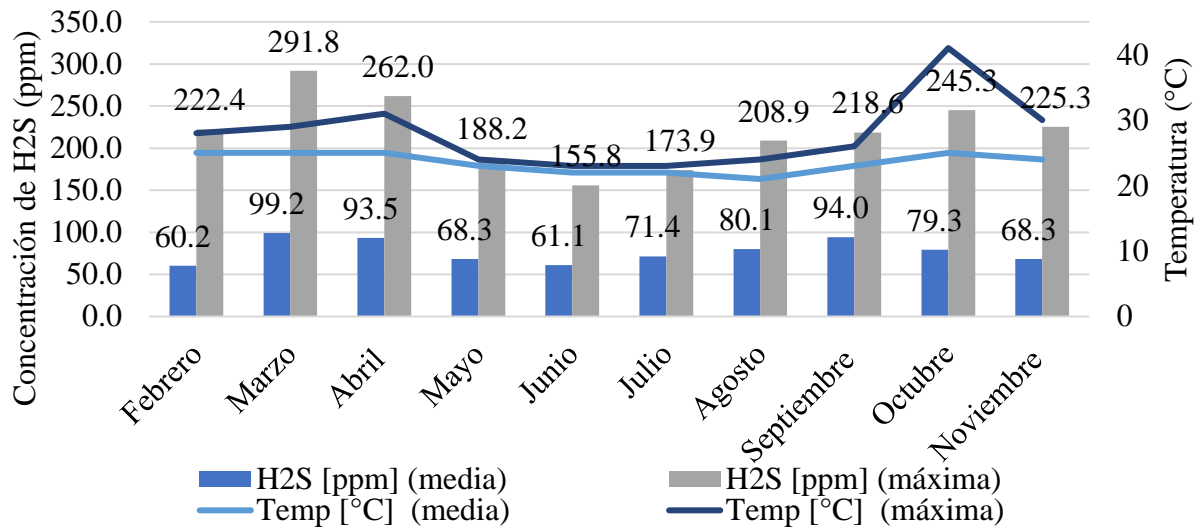


Figura 3. Concentración de H2S y temperatura a lo largo de los meses.

4.2 Análisis del frente de carbonatación

Luego de remover la capa no consistente de aproximadamente 8 cm de la pared del pozo húmedo, se observó que el hormigón estaba carbonatado, ya que no cambió de color con la aplicación de la solución de fenolftaleína. Luego, se hizo un orificio de 5 cm, observando que la región más interna del hormigón aún estaba alcalina, como se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Muro de pozo húmedo con hormigón alcalino.

4.3 Resistencia a la compresión

En los resultados de los ensayos de compresión directa, ilustrados en la Tabla 1, se observó que todos los núcleos extraídos presentaron resistencias superiores a las especificadas en proyecto (20 MPa). A pesar de la condición atípica observada en la superficie del hormigón, este resultado ya era esperado, ya que la parte utilizada en el ensayo era la parte central de la muestra, que todavía no parecía haber sido contaminada por ácido sulfúrico biogénico.

Tabla 1. Resultados directos de la resistencia a la compresión

n°	Dimensiones medias (mm)		fci,ext, inicial (MPa)	k1	k2	k3	k4	fci,ext (*) (MPa)
	Altura (h)	Diámetro (d)						
1	109,2	73,6	56,3	-0,04	0,09	0,05	-0,04	59,7
2	111,2	73,6	55	-0,04	0,09	0,05	-0,04	58,3
3	93,0	73,6	56	-0,07	0,09	0,05	-0,04	57,7
4	145,3	73,6	54,1	0,00	0,09	0,05	-0,04	59,5

NOTA - (*) Resultados corregidos de la resistencia obtenida en la ruptura de las probetas extraídas por los coeficientes k1, k2, k3 y k4, conforme ítem 5.2 de la ABNT NBR76801:2015.

4.4 Prueba petrográfica

El grosor identificado de la región atacada en los portaobjetos preparados corresponde a 1,6 mm a 4,1 mm para la probeta 1 y de 500µm a 3,7 mm para la probeta 2. La figura 5 muestra la ubicación de la interfaz entre la región atacada (arriba) y la región aparentemente no afectada (inferior) para ambas probetas. Nótese, en tonos azules, la presencia de microfisuras y microporosidad. La región atacada de ambas probetas presenta tres zonas de alteraciones distintas:

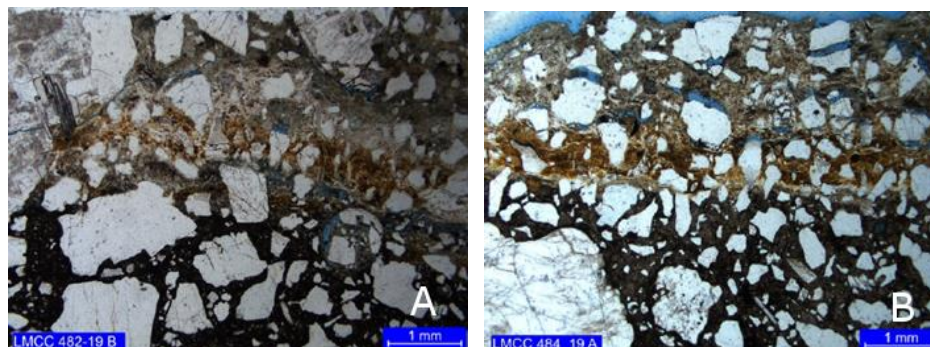


Figura 5. Ubicación de la interfaz entre las regiones de las probetas (a) 1 y (b) 2. Polarización simple con capacitor.

Zona primaria (más externa): caracterizada por una intensa sustitución de la pasta por cripta de baja birrefringencia a material microcristalino, posiblemente Gipsita, con textura similar a “mortero” (Figura 6). La probeta 1 también exhibe la presencia puntual de carbonatación.

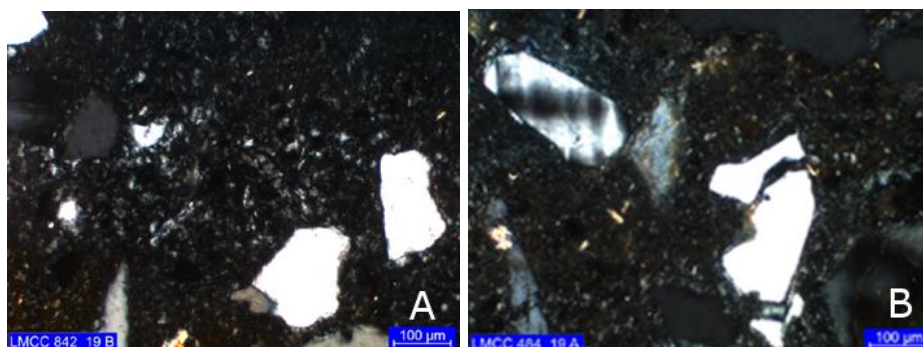


Figura 6. Primera capa de alteración, posiblemente Gipsita en las probetas (a) 1 y (b) 2. Polarización cruzada, con capacitor.

Zona secundaria (intermedia): muestra reemplazo parcial de la pasta, con impregnación de hidróxidos de hierro y posible materia orgánica (Figura 7). En el trabajo de Sun (2015), el enriquecimiento en Fe, por precipitación de óxido, fue atribuido como una de las causas de la presencia de microfisuras en las zonas de alteración del hormigón.

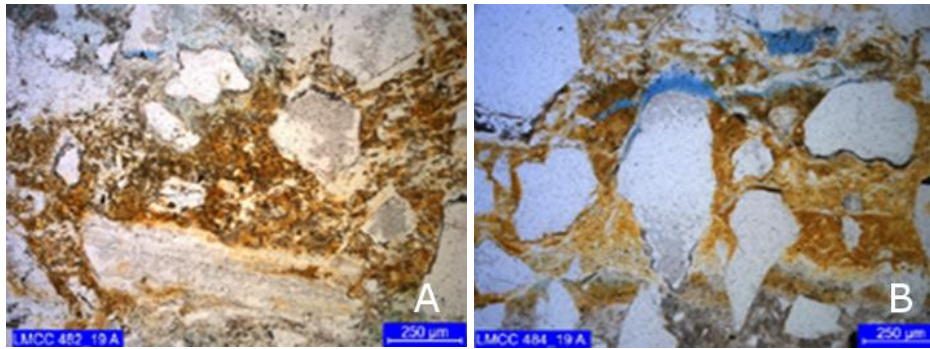


Figura 7. Impregnación de hidróxidos de hierro (tonos rojizos) en las probetas (a) 1 y (b) 3. Polarización simple con condensador.

Zona terciaria: esta es una zona de carbonatación discontinua en la interfaz con el hormigón aparentemente no atacado (Figura 8).

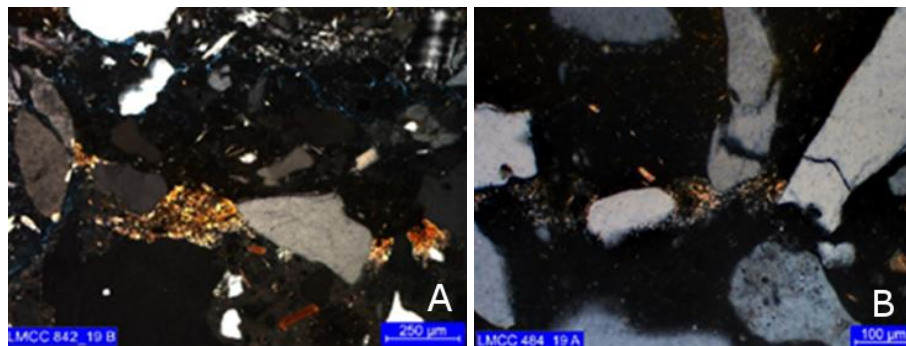


Figura 8. Presencia de carbonatación (tonos amarillentos) en el umbral entre las regiones atacadas (arriba) y aparentemente no afectadas (abajo) en las probetas (a) 1 y (b) 2. Polarización cruzada con capacitor.

En ambas probetas (Figura 9), las tres zonas presentan abundantes microgrietas, sin relleno o parcialmente rellenas por cripta de baja birrefringencia a material microcristalino, Gipsita.

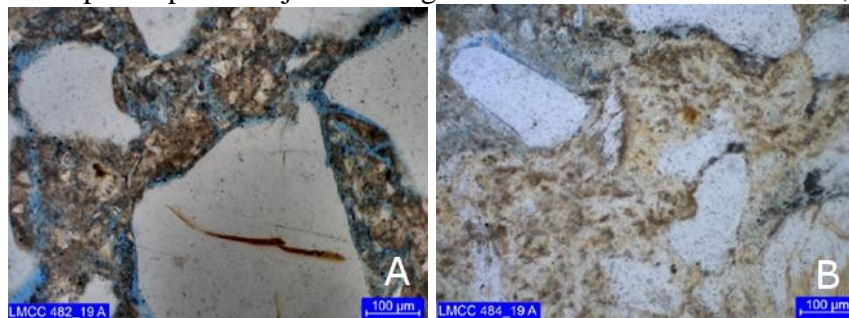


Figura 9. Zonas de microporosidad en la pasta asociadas a microgrietas en tonos azules (a) 1 y (b) 2. Polarización simple, con condensador.

4.5 Microscopía Electrónica de Barrido - SEM

El análisis de la microestructura reveló cambios mineralógicos considerables en la superficie atacada (Figura 10). Se identificaron cristales de fase cristalina de sulfoaluminosilicato en la muestra, con contenido de Ca, Fe y K. En la figura 10, las flechas apuntan a los sitios de análisis por sistema de dispersión de energía (EDS – Figura 11).

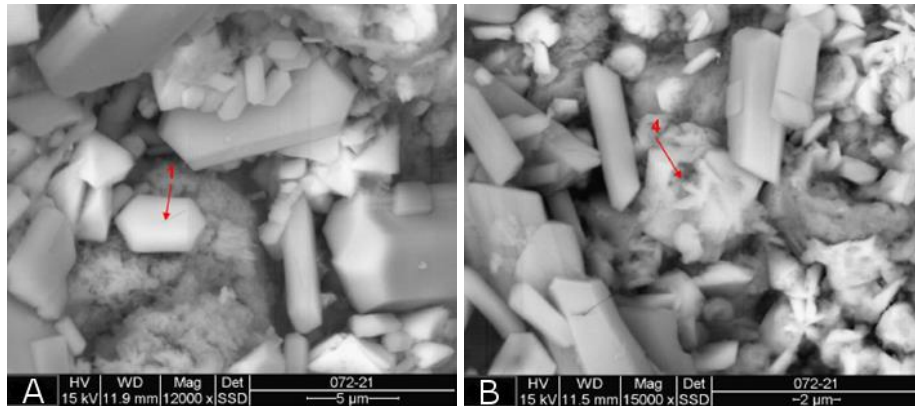


Figura 10. SEM de las fases cristalinas de sulfoaluminosilicato que contienen Ca, Fe y K.

En la micrografía del material raspado no se identificó la presencia de cristales de portlandita, lo que indica que se ha disociado por completo. Se puede ver que el ácido redujo la matriz a un material más poroso, consistente en partículas más pequeñas.

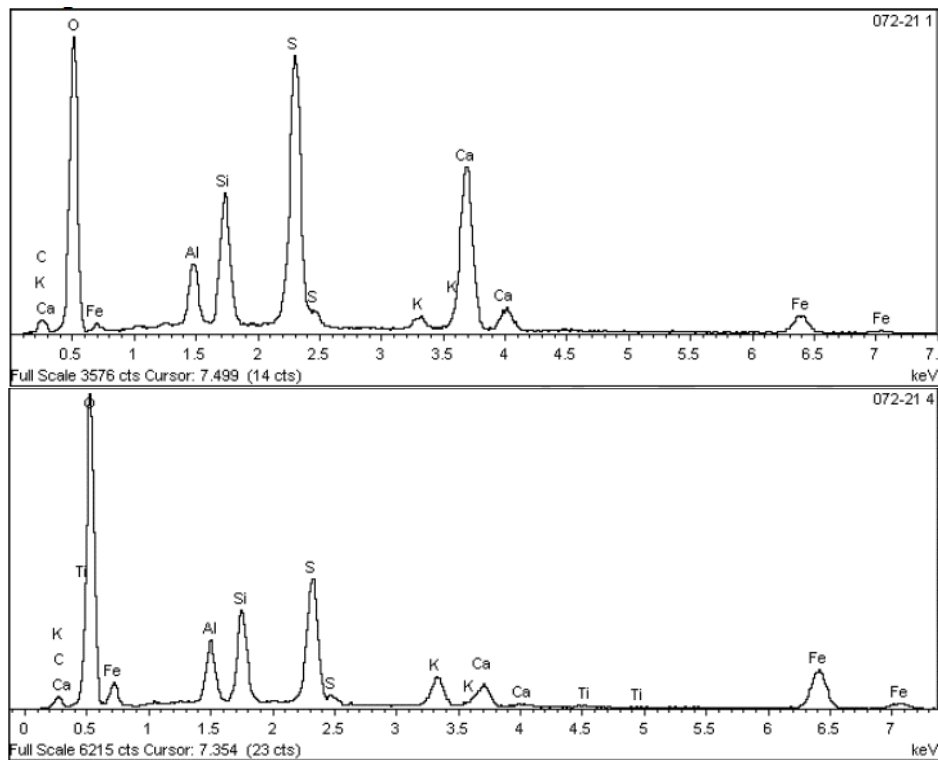


Figura 11. Espectros de los microanálisis puntuales indicados en la Figura 10 (a) y (b)

En la muestra intermedia se analizaron dos fragmentos de las porciones clara y oscura. En la porción más clara se identificaron cristales de morfología rectangular de sulfato de calcio hidratado (Foto 12.a), según el espectro EDS (Figura 13) con fuertes señales de S y Ca, sugiriendo Gipsita como componente principal y cristales de Etringita. (Foto 12.b)

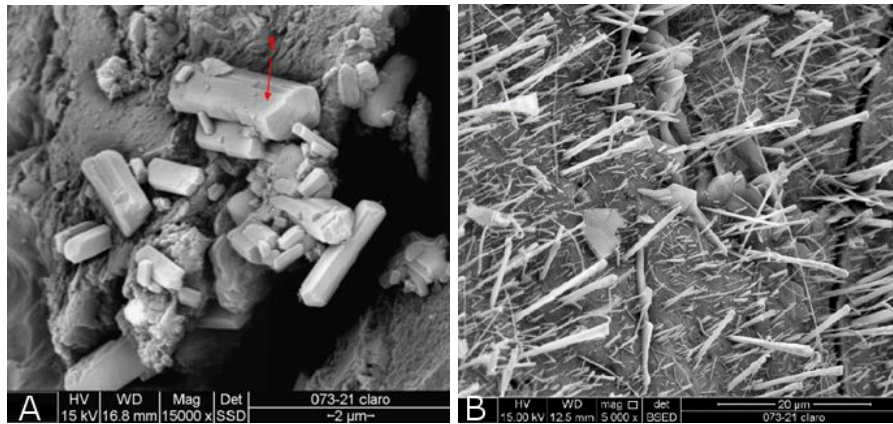


Figura 12. Muestra intermedia: fragmentos de la porción transparente (a) sulfato de calcio hidratado y (b) cristales de Etringita.

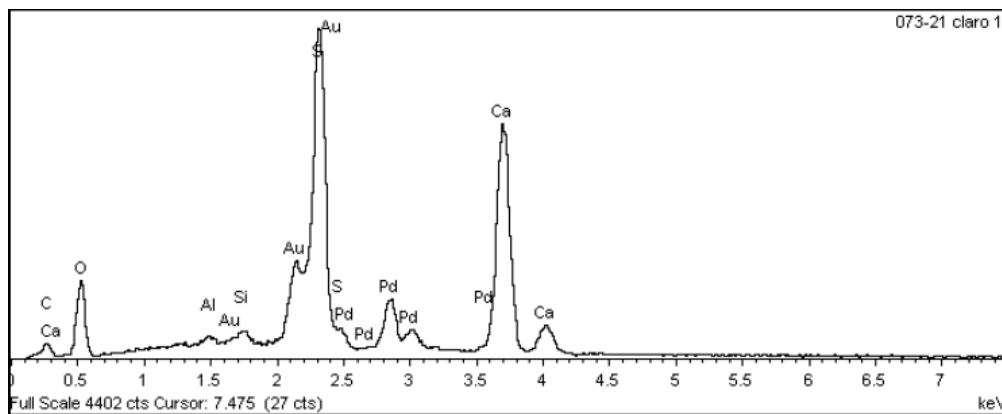


Figura 13. Espectro de la muestra intermedia de microanálisis puntual de la Figura 12.a

En los fragmentos analizados de la porción más oscura de la muestra intermedia se identificaron cristales de aluminosilicato de calcio con azufre o sulfoaluminosilicato de calcio (Figura 14).

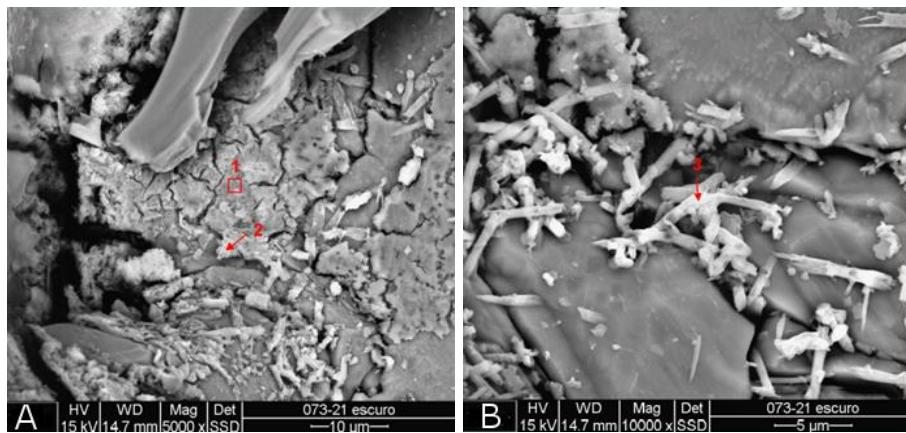


Figura 14. Cristales de aluminosilicato de calcio de muestra intermedia con azufre o sulfoaluminosilicato de calcio - fragmentos de la porción oscura

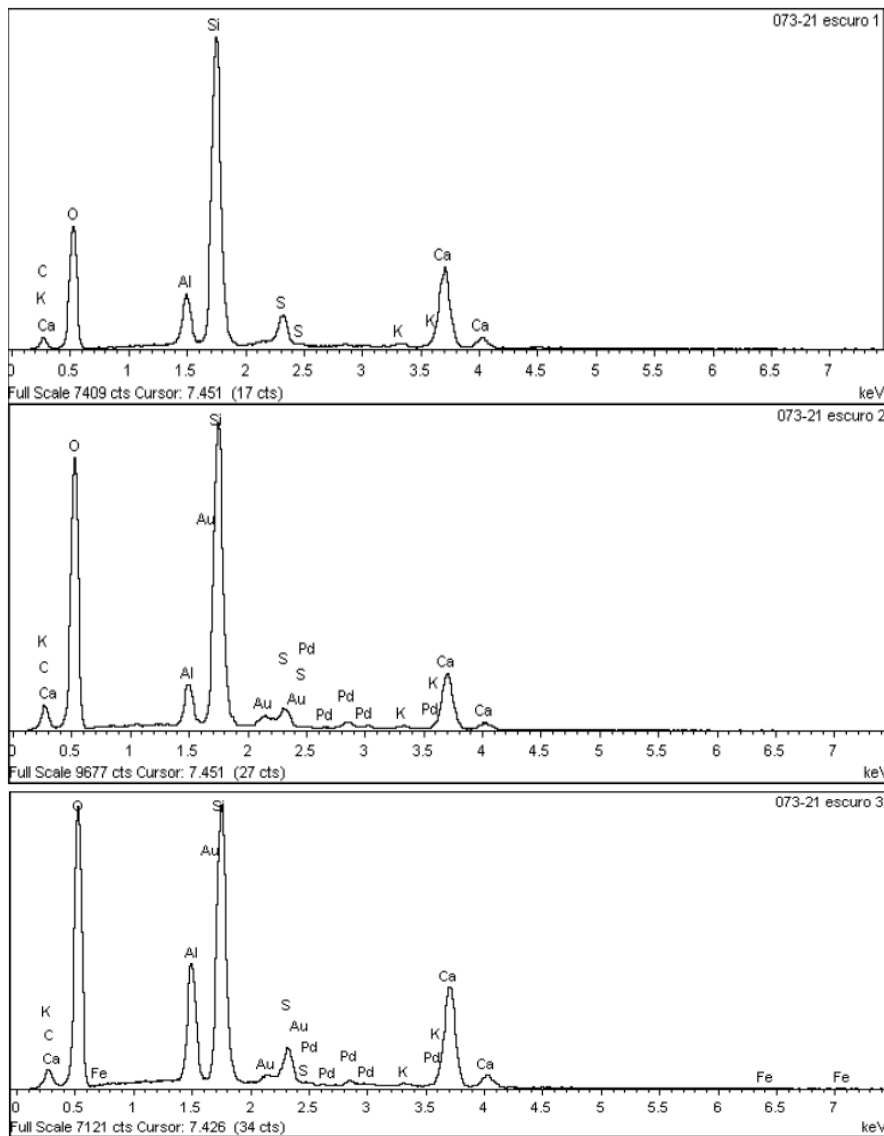


Figura 15. Espectros de los microanálisis puntuales indicados en la Figura 14 a y b.

En la muestra más interna, aparentemente no atacada, se pueden observar placas de portlandita mayores de 10 μm con agujas de etringita no patológicas en un tejido C-S-H (Figura 16).

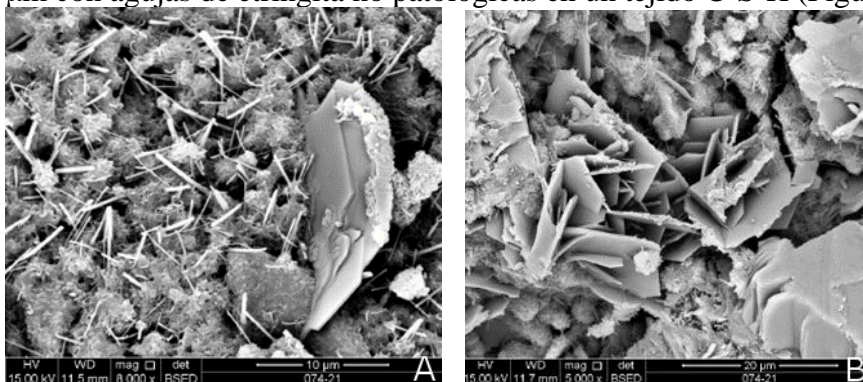


Figura 16. SEM de la muestra más interna con aumento de (a) 10 μm y (b) 20 μm

4.6 Difracción de rayos X - XRD

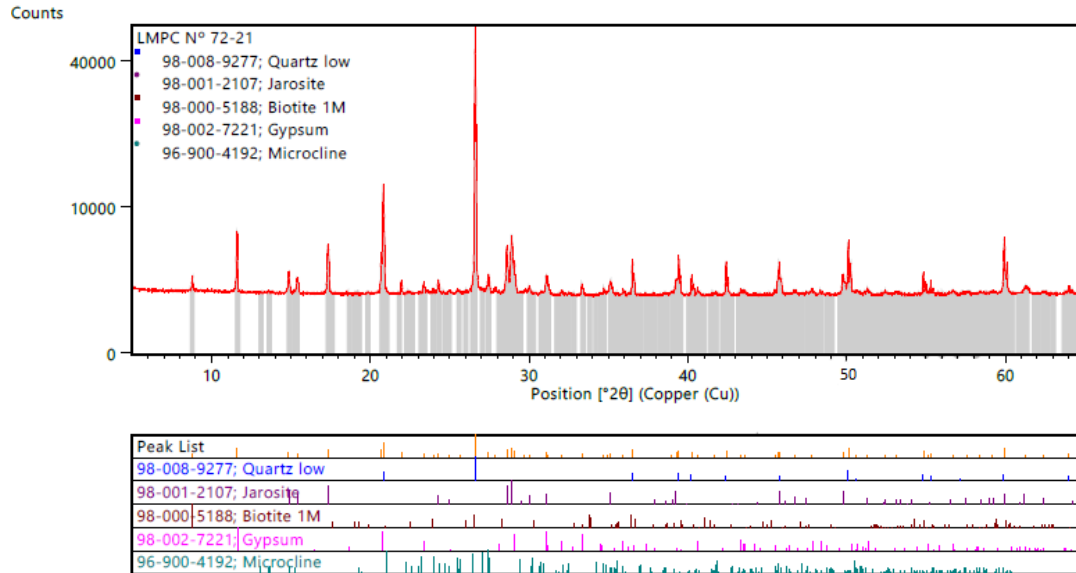


Figura 17. Difractograma de rayos X - material raspado.

En la muestra raspada (Figura 17) se identificó la presencia en mayor concentración de Jarosita y Gipsita. Tazaki et al., (1992) encontraron resultados similares en tuberías de hormigón severamente corroídas. Según los autores, en condiciones de pH extremadamente bajas, la actividad bacteriana puede descomponer la piritita (disulfuro de hierro, FeS_2) para formar Jarosita. Habitualmente, los principales microorganismos identificados implicados en estas reacciones son *Thiobacillus ferrooxidans* y/o *Thiobacillus thiooxidans*. En el estudio de Song et al., (2020), cuando la superficie grabada del hormigón alcanzaba la superficie de las barras de acero, el proceso de corrosión de las barras se aceleraba por el H_2S , formándose sulfuro de hierro, siendo uno de los compuestos identificados FeS_2 . Así, es posible que la formación de jarosita provenga del FeS_2 , formado por la oxidación de barras de acero de 16 mm ubicadas en la región atacada. La Gipsita también fue identificada como el compuesto más abundante en la superficie grabada del hormigón por autores como Fernandes et al., (2012), Davis et al., (1998), Song, et al., (2018) y Song et al., (2020).

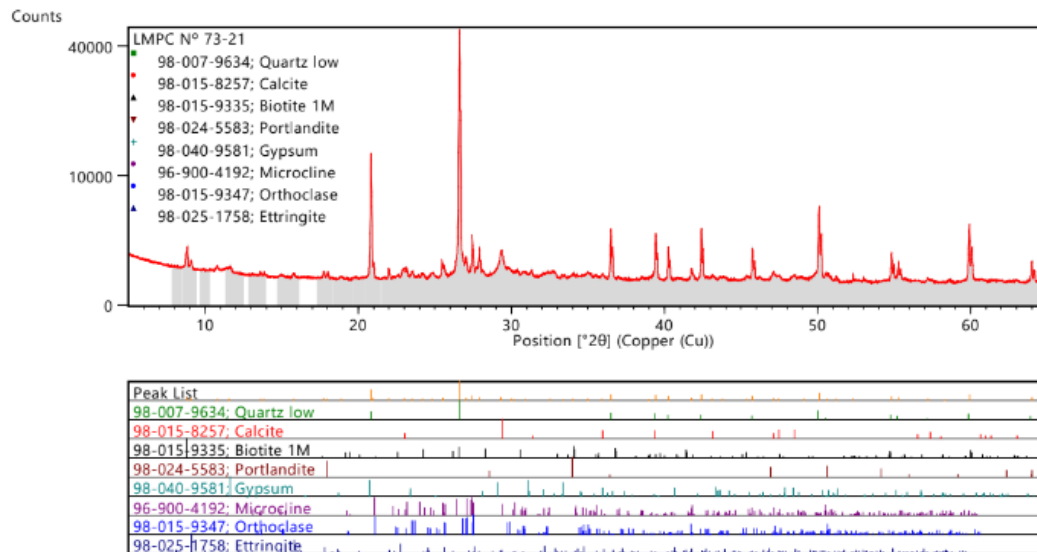


Figura 18. Difractograma de rayos X – muestra intermedia.

Los resultados obtenidos por XRD confirman la presencia de Gipsita en el hormigón en todas las capas analizadas. La presencia de Gipsita identificada en la capa más interna (Figura 19), aparentemente no atacada, también indica el inicio de la degradación en esta capa. A partir de la muestra intermedia ya es posible identificar la presencia de Etringita, probablemente debido a un mayor pH capaz de garantizar la estabilidad de esa fase. La presencia de calcita en las muestras intermedias y más internas puede provenir del producto de la reacción de carbonatación entre el hidróxido de calcio y el dióxido de carbono.

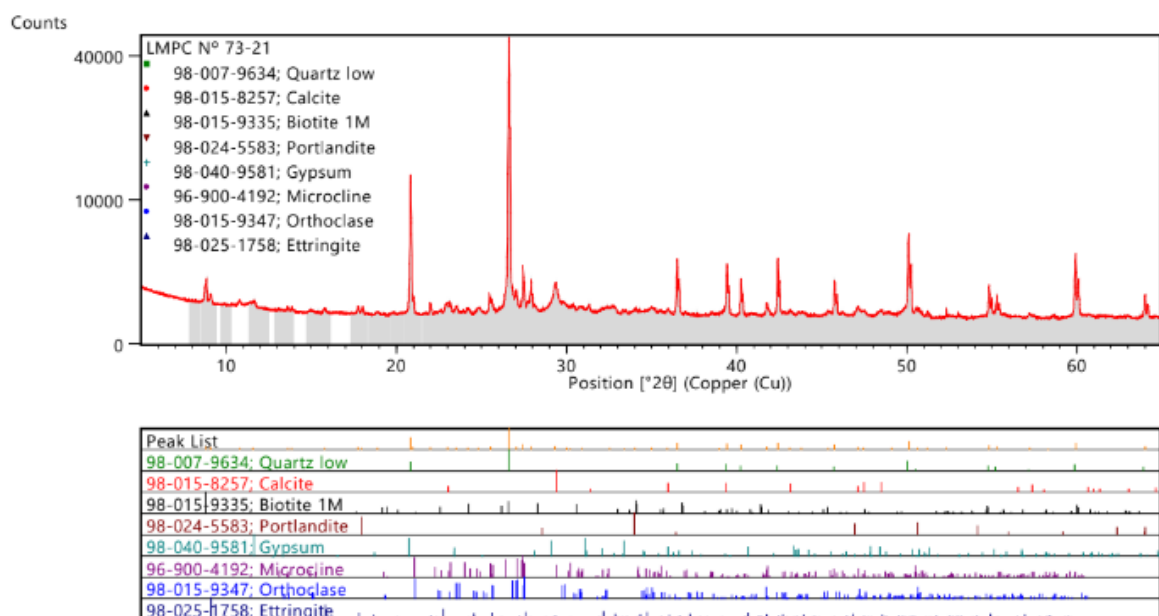


Figura 19. Difractograma de rayos X: muestra más interna.

4.7 Determinaciones químicas

Los resultados obtenidos en las determinaciones químicas de los materiales, expresados en base original y en base seca, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la determinación química superficial

Determinaciones	Resultados, en %		
	Ataque de ácido nítrico (HNO ₃)	Ataque de agua (fracción soluble en agua)	Diferencia (fracción soluble en ácido)
Resíduo insolúvel	65,1	56,7	8,4
Ferro (Fe)	0,73	0,01	0,72
Sódio (Na)	0,04	0,02	0,02
Potássio (K)	0,11	0,01	0,10
Cálcio (Ca)	0,74	0,73	0,01
Magnésio (MgO)	0,01	0,01	0,00
Íons silicato (SiO ₃ ²⁻)	0,49	0,38	0,11
Íons sulfato (SO ₄ ²⁻)	0,41	0,40	0,01
Íons cloreto (Cl ⁻)	0,11	0,05	0,06

NOTA – (*) La cantidad que falta para el 100% en la mesa se refiere al agua indeterminada. Se destaca que ambos resultados de las determinaciones están en la misma base de cálculo y, por lo tanto, fue posible determinar la diferencia entre ellos.

Los elementos que se encuentran en la fracción hidrosoluble están asociados al gel ácido formado a partir de silicatos, sulfatos y cloruros de sodio, potasio, magnesio y calcio. La muestra analizada presentó pH 2,8 a 19,8°C. Esta condición favorece la colonización de microorganismos oxidantes de azufre acidófilos (*p. ej.*, *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus Ferrooxidans*), que se asocian con la oxidación severa del acero (Wu et al., 2020), justificando la corrosión/disolución de barras de acero de 16 mm de diámetro. El resultado del pH también justifica la ausencia de Etringita en la capa superficial. Los microorganismos acidófilos, además de oxidar H₂S a ácido sulfúrico, son capaces de oxidar tiosulfato y azufre elemental que pueden depositarse en la superficie del hormigón (Wells et al., 2009).

En cuanto a los niveles significativos de elementos encontrados en la fracción soluble en ataque de ácido nítrico (HNO₃) (insolubles en agua, en las condiciones de ataque propuestas en el citado ensayo) se encuentran asociados a Jarosita [K₂Fe₆(OH)₁₂(SO₄)₄] y posible presencia de hisingerita [Fe₃Si₂O₅(OH)₄·2H₂O], hidróxido ferroso [Fe(OH)₂] y cloruro ferroso [FeCl₂].

Según Alexander y Fourie (2011), el hidróxido de aluminio [Al(OH)₃] y el hidróxido de hierro [Fe(OH)₃] pueden precipitar en la capa después de la disolución de las fases de aluminato y/o hierro-aluminato dependiendo del ion concentración hidrógeno en solución - precipita hidróxido de hierro a un pH superior a 1,0 y precipita hidróxido de aluminio a un pH superior a 3,0.

El ácido sulfúrico biogénico anula el ambiente alcalino que protege inicialmente las barras de acero, provocando la corrosión del refuerzo. La corrosión tradicional de las barras de acero es un proceso electroquímico que provoca la disolución del hierro, formándose diversos productos de corrosión, generalmente óxidos e hidróxidos de hierro. Sin embargo, como señala Song et al., (2020), cuando el ataque del ácido sulfúrico biogénico alcanza la superficie del acero, las reacciones y los productos de corrosión pueden ser diferentes. En el trabajo de los autores, los principales productos de corrosión de las barras de acero incluyen óxidos de hierro, oxihidróxidos de hierro, sulfuros de hierro, cloruros de hierro y sulfato de hierro. Aunque los compuestos que contienen hierro se derivan en su mayoría de la disolución de las barras de acero ubicadas en la región atacada, estos compuestos también pueden provenir de la disolución de la pasta de cemento, ya que el cemento Portland contiene alrededor del 3 % de Fe₂O₃ (Jiang et al., 2014). La formación de hisingerita, por ejemplo, puede indicar la interacción de Fe, producto de la corrosión del acero y/o pasta de cemento, con Si procedente de la disolución de C-S-H.

5. CONCLUSIONES

De la inspección de la Estación de Bombeo de Aguas Residuales se pueden inferir las siguientes conclusiones:

1. Factores como la temperatura y la turbulencia del efluente influyen en la velocidad de degradación de la estructura, debido a la mayor liberación de ácido sulfhídrico al aire;
2. La resistencia a la compresión se conservó en toda la parte de la muestra, así como su alcalinidad, a pesar del severo deterioro y carbonatación en la región más externa del hormigón;
3. En el ensayo petrográfico se pudo visualizar que la región atacada presenta zonas de distintas alteraciones, todas con abundante presencia de microfisuras;
4. El grabado ácido incluye la disolución de las fases de cemento, el transporte de especies químicas disueltas y la (re)precipitación como minerales secundarios, como se observa en XRD y SEM/EDS. La Gipsita, responsable del aspecto blanquecino observado en la superficie del hormigón, y la Jarosita fueron los principales compuestos identificados en la superficie atacada. Además de los compuestos antes mencionados, se identificaron hidróxido ferroso [Fe(OH)₂] y cloruro ferroso [FeCl₂] y la posible presencia de hisingerita, lo que indica la interacción de la sílice proveniente de la disolución de CSH con otros

productos de la corrosión del acero y/o pasta de cemento. Los resultados muestran que cuando el ácido llega a la armadura, la capa que pasiva se anula, existiendo tanto productos de corrosión en la superficie atacada, tanto de la disolución de la pasta de cemento como del acero, así como una posible interacción entre ambos. Solo se detectó Etringita en la capa intermedia del hormigón, lo que confirma que es un producto intermedio de la reacción.

5. La estructura analizada mostró un rápido deterioro en un corto período, presentando la necesidad de intervención antes del final de la vida útil esperada, lo que indica que las especificaciones normativas vigentes sin otras medidas de protección no garantizan la durabilidad del hormigón en ambientes con alta concentración de sulfuro de hidrógeno gaseoso.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo por permitir la disponibilidad del análisis de la estructura y por subsidiar todos los ensayos presentados.

7. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR 7680: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 9917:2009 Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 13810:1997 Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM International. (2018). *ASTM C114/2018 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*
- ASTM International. (2017). *ASTM C 856/2017 Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*
- Alexander, M. G., Fourie, C. (2011), *Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack*. Materials and Structures, v. 44, pp. 313–330. DOI: [10.1617/s11527-010-9629-1](https://doi.org/10.1617/s11527-010-9629-1)
- Davis, J. L., Nica D., Shields K., Roberts D. J. (1998), *Analysis of concrete from corroded sewer pipe*. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 42, pp. 75–84. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(98\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00049-3)
- Duchesne, J., Bertron, A. (2013), *Leaching of cementitious materials by pure water and strong acids (HCl and HNO₃)*. In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments: State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 - PAE, 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3_4
- Eřtoková, A., Harbul'áková, V. O., Luptáková, A., řtevilová, N. (2012), *Study of deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack*. Procedia Engineering, v. 42, pp. 1731-1738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.566>.
- Fernandes, I. et al. (2012), *Identification of acid attack on concrete of a sewage system*. Materials and Structures, v. 45, n. 3, p. 337–350. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9769-y>.
- House, M. W., Weiss, W. J. (2014), *Review of Microbially Induced Corrosion and Comments on Needs Related to Testing Procedures*. Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, pp. 94-103. DOI: <https://doi.org/10.5703/1288284315388>.
- Jiang, G., Wightman, E., Donose, B., Yuan, Z., Bond, P., Keller, J. (2014), *The role of iron in*

- sulfide induced corrosion of sewer concrete*. Water research. V.49. pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.007>.
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., Verstraete, W. (2000), *Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete*. Cement and Concrete Research, v. 30, pp. 623-634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2).
- O'Connell, M., McNally, C., Richardson, M. (2010), *Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review*. Cement and Concrete Composites, v 32, p 479–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001>.
- Scrivener, K., Belie, N. (2013), *Bacteriogenic Sulfuric Acid Attack of Cementitious Materials in Sewage Systems*. In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, pp.305-318. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3_12.
- Song, Y., Tian, Y., Li, X. Wei, J., Zhang, H., Bond, P., Yuan, Z., Jiang, G. (2018), Distinct microbially induced concrete corrosion at the tidal region of reinforced concrete sewers. Water Research. 150. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.083>.
- Song, Y., Wightman, E., Kulandaivelu, J., Bu, H., Wang, Z., Yuan, Z., Jiang, G. (2020), *Rebar corrosion and its interaction with concrete degradation in reinforced concrete sewers*, Water Research. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115961>.
- Song, Y., Chetty, K., Garbe, U., Wei, J., Bu, H., O'moore, L., Jiang, G. (2021), *A novel granular sludge-based and highly corrosion-resistant bio-concrete in sewers*. Science of The Total Environment, 791, 148270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148270>.
- Tazaki, K., Mori, T., Nonaka, T. (1992), *Microbial jarosite and gypsum from corrosion of Portland Cement concrete*. Canadian Mineralogist. v. 30, pp. 431-444.
- Wells, T., Melchers, R. E., Bond, P. (2009), Factors involved in the long term corrosion of concrete sewers. In: Annual Conference of the Australasian Corrosion Association, 49th.
- Wu, L., Hu, C., Liu, W.V. (2018), *The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel—A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada*. Sustainability. v. 10, 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020517>.
- Wu, M., et al. (2020), *Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena*. Construction and Building Materials, v. 239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813>.
- Yuan, H. (2013), *Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack*. Tese de Doutorado, Université Paris-Est. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.002>.

Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís

A. Hernández Oroza^{1*} , A. Diomedes Almeida¹, A. Romeo Sáez¹, P. R. Cuétara Pérez¹ 

*Autor de Contacto: ahernandez@proyectos.ohc.cu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

Recepción: 11/01/2022 | Aceptación: 20/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es diagnosticar y proponer solución a las lesiones presentes en los forjados de madera del Convento de Santa Clara. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos de resistografía y penetrómetro, estudios biológicos a la madera, y técnicas geomáticas para análisis de deformación y dimensionamiento de las vigas. Los resultados del diagnóstico demostraron que el 65% del forjado compuesto de 98 vigas, está afectado por pudrición y organismos xilófagos. Los estudios de densidad mediante comparación con valores de referencia, mostraron pérdida en la dureza de la madera. Los resultados concluyen que la restauración implica la necesidad de sustituir 17 vigas, y el refuerzo de los pies derechos y secciones de vigas de corredera.

Palabras clave: ensayos no destructivos, diagnóstico, edificaciones, patrimonio, geomática.

Citar como: Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R. (2022), “*Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís*”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 296 – 310, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

¹Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor A. H. Oroza contribuyó con el diseño de la investigación y la realización de ensayos en obra (100%), la redacción del texto (50%), la discusión de resultados (100%) y revisión (50%). La autora A. Diomedes Almeida contribuyó con el diseño de la investigación y la realización de ensayos en obra (100%), redacción del texto (20%) y revisión (25%). La autora A. Romeo Sáez contribuyó en la investigación biológica (100%), redacción del texto (20%) y revisión (25%). El autor P. R. Cuétara Pérez contribuyó con el levantamiento con escáner láser y procesamiento digital 3D/ortoimágenes (100%) y redacción del texto (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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Diagnosis and solutions proposal to the damages present in the ceiling of the Convent of Santa Clara de Asís

ABSTRACT

For the restoration of the wooden ceilings of the Convent of Santa Clara, resistography and penetrometer tests, biological studies of the wood, and geomatic techniques for analysis of deformation and dimensioning of the beams were applied. In the present work, the results of the diagnosis showed that 65% of 98 beams is affected by rot and the presence of xylophagous organisms. Density studies by comparison with reference values, showed a loss in the hardness of the wood. The results conclude in the need to replace 17 beams, and the reinforcement of the wood pillars and sections of sliding beams.

Keywords: non-destructive testing, diagnosis, buildings, heritage, geomatics.

Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís

RESUMO

Para a restauração dos pisos de madeira do Convento de Santa Clara, foram aplicados ensaios de resistografia não destrutiva e penetrometria, estudos biológicos da madeira e técnicas geomáticas para análise de deformação e dimensionamento das vigas. No presente trabalho, os resultados do diagnóstico mostraram que 65% da laje de 98 vigas é afetada por podridão e organismos xilófagos. Estudos de densidade por comparação com valores de referência, mostraram uma perda na dureza da madeira. Os resultados concluem na necessidade de substituição de 17 vigas, e do reforço dos pés direitos e secções de vigas deslizantes.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, diagnóstico, edificações, patrimônio, geomática.

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 conservación de las edificaciones patrimoniales continúa siendo en la actualidad uno de los problemas más complejos dentro del campo de la construcción. Como consecuencia de los siglos de exposición, estas estructuras han estado sometidas a la influencia de los efectos del cambio climático y el incremento en la atmósfera de gases corrosivos (SO_2 , NO_x , O_3), lo que ha conllevado a un deterioro acelerado de sus materiales constituyentes (piedra, metal, madera) debido a reacciones químicas, colonización biológica y formación de costras negras (Kherais et al., 2021; Kumar and Imam, 2013; Sesana et al., 2021). Esto puede significar un riesgo importante en la durabilidad del patrimonio cultural, el cual debe ser debidamente evaluado por un grupo de trabajo multidisciplinario, apoyado en diferentes técnicas de ensayo, muchas de las cuales se basan en técnicas destructivas como las extracciones de probetas y realización de calas. Sin embargo, al tratarse de la conservación del patrimonio edificado, este tipo de estudios invasivos debe intentar evitarse para mantener la integridad de la obra, sus elementos estructurales y en consecuencia, su valor patrimonial.

En la actualidad existen novedosas técnicas de ensayos no destructivos (END) que aportan información con elevado nivel de precisión, exactitud, repetibilidad y confiabilidad. Las aplicaciones desarrolladas se basan en diferentes principios, como las electromagnéticas (ultrasonidos, potenciales, resistividad), de impacto (esclerometría, penetrómetro), geomáticas (escáner láser, fotogrametría), emisivas (termografía), entre otras.

El análisis cuantitativo obtenido de estos resultados durante el diagnóstico permite identificar las causas de las lesiones, evaluar el grado de deterioro o pudrición (Liñán et al., 2011) y seguidamente la toma de acciones correctivas y de conservación necesarias.

El Convento de Santa Clara de Asís se inaugura en La Habana en el año 1644, convirtiéndose en el primer convento de religiosas fundado en Cuba. En el año 2018 la Oficina del Historiador de La Habana (OHCH) inicia un proyecto de restauración y recuperación que ha involucrado profesionales y estudiantes de diferentes ramas de las carreras técnicas, y profesionales vinculadas al campo de la construcción y la conservación del patrimonio edificado. Los resultados que se han ido obteniendo de estas investigaciones permitieron el establecimiento de las prioridades y las metodologías para su paulatina intervención y recuperación (Guevara et al., 2019).

El objetivo de este trabajo es evaluar el estado de conservación en la estructura del forjado de madera de la galería de circulación ubicada en la planta alta del primer claustro, para el cual se combinaron una serie de END que permitieron identificar las patologías presentes, y determinar la magnitud de las lesiones en las vigas y pies derechos que la conforman. Lo anterior implica una propuesta de solución que se discute al final del trabajo.

2. CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

2.1 Identificación del objeto de estudio

La estructura se ubica en la planta alta del primer claustro, hacia el bloque A (Figura 1). Se basa en un forjado de madera y tablazón conformado por 98 vigas de 9 cm x 13 cm (base x altura), espaciadas entre 43 cm y 45 cm con una inclinación de 17 grados desde el muro hacia los pies derechos, apoyadas por el eje 3 en el muro de tapial que conforma la iglesia, y por el eje 4 en una viga corredera que descansa sobre 13 pies derechos. La viga de corredera se compone de 12 vigas unidas mediante rayo de Júpiter, las cuales descansan sobre los pies derechos (Tabla 1). La cubierta está formada por tejas de cerámica roja.

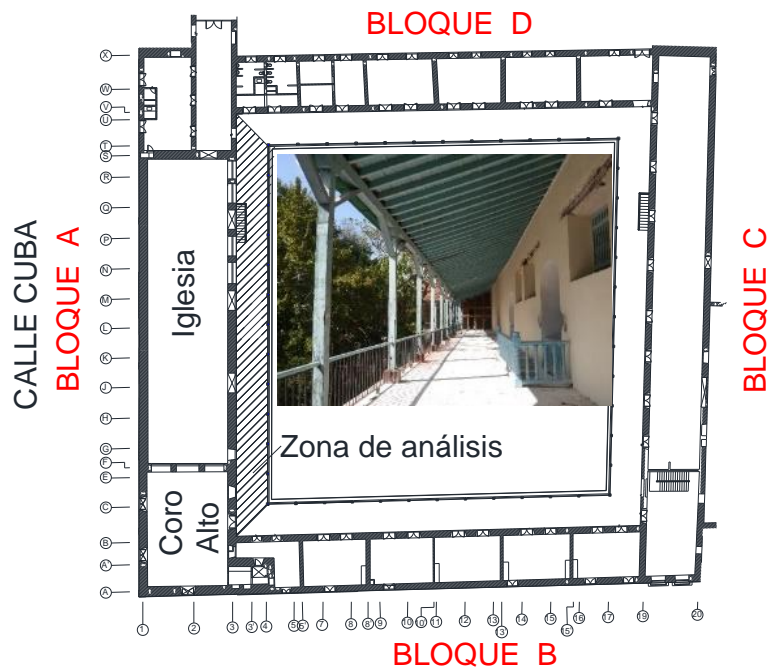


Figura 1. Croquis de planta del primer claustro, señalización y fotografía de la galería estudiada

2.2 Análisis y selección de los ensayos no destructivos

El propósito de los END es determinar la calidad e integralidad del material y sus partes componentes sin afectar sus propiedades, funciones y utilidad mediante inspecciones, mediciones o evaluaciones (Helal et al., 2015; Workman and Moore, 2012). La aplicación de este tipo de técnicas para estudiar el estado de conservación de las edificaciones históricas ha ganado validez, propiciado fundamentalmente por la ventaja de no requerirse de incurrir en un deterioro adicional en los elementos estructurales de la edificación, para conocer su estado de conservación (Binda and Saisi, 2009; Liñán et al., 2011; Ortega and Ripani, 2007). Debido a que la madera es un material orgánico, es susceptible a procesos de degradación provocados por insectos xilófagos, acciones mecánicas, exposición al intemperismo, pudrición por hongos o la acción del fuego.

En edificaciones patrimoniales el empleo de los END le aporta un elevado valor al estudio de diagnóstico, debido a que los elementos estructurales de madera no son afectados o reciben un impacto despreciable. Como resultado, es posible obtener información técnica con suficiente precisión para estimar el estado de conservación, la calidad y durabilidad de la obra u objeto de obra estudiado (Hasníková and Kuklík, 2014; Morales-Conde et al., 2013; Palaia et al., 2008).

Las técnicas de trabajo aplicadas fueron:

- Inspección visual de las lesiones presentes en todos los elementos estructurales
- Medición de parámetros ambientales y humedad superficial de los elementos de madera
- Identificación de las especies de madera presentes
- Dimensionamiento de los elementos de madera que conforman el forjado
- Aplicación de termografía infrarroja
- Detección de daños interiores en la madera mediante resistografía
- Estimación de dureza mediante penetrómetro
- Evaluación estructural a partir de modelo 3D obtenido con escáner láser terrestre (TLS- siglas en inglés)
- Elaboración de planos de planta y cortes en plataforma CAD

2.2.1 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva que permite el análisis patológico mediante la emisión de energía calorífica por parte de los materiales. La lectura de la radiación emitida en la banda del infrarrojo posibilita interpretar la temperatura del material en función de la conductividad térmica o el calor específico. En dependencia de las características y las condiciones de exposición, este material puede retener o emitir calor. La emisividad está definida por la Ley de Stefan-Boltzman, la cual plantea que la radiación es proporcional a la temperatura del cuerpo y las propiedades térmicas del material (Morales-Conde et al., 2013). Las imágenes se tomaron con una cámara FLIR E75 y se procesaron posteriormente empleando el software FLIR Tools.

2.2.2 Resistografía

El resistógrafo es un equipo especialmente diseñado para identificar con facilidad las zonas con cavidades, deformaciones, ablandamientos, entre otras lesiones propias de la madera (Ortiz et al., 2017). Se empleó un equipo modelo IML Resi PD400 y se procesaron los resultados con el software PD-Tools. La resistografía se realizó en los elementos seleccionados basándose en los deterioros encontrados durante el punctionado y la inspección visual de lesiones. En las vigas las mediciones se efectuaron principalmente en los extremos de las vigas que se encuentran empotrados dentro del muro, en tres direcciones: diagonal, horizontal y vertical en función de las patologías de cada elemento ensayado. En los pies derechos, las mediciones se realizaron en sentido diagonal en las bases para conocer el estado de conservación en el apoyo, y en dirección horizontal a diferentes alturas, desde la base con separación de 150 mm entre cada punto de medida resistográfica.







2.2.3 Dureza mediante penetrómetro Pilodyn

Es una herramienta que permite estimar la dureza de la madera mediante la penetración de una varilla de acero de 1.5 mm de diámetro, a partir de un disparo hacia el elemento de madera (Palaia et al., 2008). La profundidad de penetración de la varilla varía en función de la densidad del material. Debido a que el resultado obtenido es adimensional, se hace necesario para su correcta interpretación, realizar varias mediciones sobre el mismo elemento y referenciarlo contra una probeta de madera de la misma especie, a una humedad conocida (Kloiber, 2007; Kuklík, 2007).

2.2.4 Identificación de especies maderables

El ensayo se realizó para conocer las especies maderables presentes en los elementos que conforman el forjado de la galería y los pies derechos que la soportan. Se tomaron muestras de 1 cm³ de volumen de los elementos de madera presentes en el área de análisis. Se realizaron cortes histológicos en las tres direcciones (transversal, tangencial y radial) para la observación de la disposición de los elementos constitutivos por especie y se compararon con las descripciones anatómicas de referencia y las claves de identificación reportadas y clasificadas dentro de una xiloteca. Los caracteres anatómicos macroscópicos evaluados fueron color, textura, olor (en las que lo poseían), lustre y la presencia de anillos de crecimiento. Las microfotografías se realizaron con una cámara digital acoplada a un microscopio Nikon modelo SMZ745. Las imágenes fueron procesadas mediante el programa IC Capture versión 2.4. Se identificaron gráficamente las especies de madera mediante la siguiente simbología (Tabla 1).

Tabla 1. Representación gráfica de las especies de madera identificadas en el forjado estudiado

Icono/Nombre		
 Ácana	 Pino	 Caguairán
 Cedro	 Baría	 Najesí

2.2.5 Levantamiento 3D y procesamiento digital

Se empleó el escáner láser Z+F Imager® 5010c. Se realizaron 11 posicionamientos, con una distancia media entre cada uno de 5 m. En el equipo se configuraron la resolución y la calidad durante el barrido en “Alta” (High), además de la adquisición de fotos. Esta configuración en el TLS implica que a los 10 metros de la ubicación del emisor, la distancia máxima de error entre los puntos marcados por el láser es de 6 mm. Con esta programación de trabajo, el tiempo de demora aproximado es de 8 minutos por cada posicionamiento, en el cual se obtiene un modelo final de puntos de coordenada x y z conocidas, con sus valores RGB.

2.2.6 Generación de modelos 3D y extracción de ortoimágenes

Para los diferentes tipos de análisis (geométrico, estructural, etc.), que pueden hacerse sobre un elemento finito, es necesaria la obtención de modelo 3D que pueda ser fácilmente manipulable y medible por los programas convencionales existentes. La información obtenida de un levantamiento 3D propicia una descripción casi continua de la superficie escaneada, lo cual hace posible identificar y cuantificar anomalías en los elementos como asimetrías, deformaciones, discontinuidades entre otras lesiones que pueden ser difíciles o imposibles de identificar a simple vista (Tucci and Bonora, 2017). A partir de los modelos 3D pueden ser extraídas las ortoimágenes, lo que posibilita obtener una proyección ortogonal del modelo de puntos, el cual tiene la misma validez métrica que un dibujo tradicional a escala (Figura 2). Los softwares comerciales basados en CAD permiten la importación de la ortoimagen, siendo posible realizar dibujos precisos que pueden ser posteriormente visualizados y analizados en otros entornos de trabajo digital.



Figura 2. Ortoimagen obtenida de la galería del bloque A

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la inspección organoléptica

Desde la viga 1 a la 17 el forjado se apoya sobre un sistema de apuntalamiento por riesgo de derrumbe debido al avanzando deterioro por pudrición, así como ausencia de varias tablas y tapajuntas. Esta situación ha provocado descenso en el resto del forjado y el fallo de algunos elementos.

La cubierta se encuentra afectada por la proliferación de plantas invasoras a todo lo largo de la galería, lo cual conlleva a un aumento del contenido de humedad en la madera, fundamentalmente en épocas de lluvia, así como del peso adicional que compromete la durabilidad de los elementos estructurales en esta zona. El resultado del diagnóstico identificó como lesiones más recurrentes a la pudrición, principalmente en la fagonadura debido a la colonización por hongos, desfibramiento producto del ataque de termitas subterráneas del género *Coptotermes*, y fallos a flexión en vigas asociados a la pérdida de la capacidad portante del elemento.

Los pies derechos que soportan el forjado presentan en el apoyo una base de hormigón, las cuales responden a una intervención realizada en la década de 1980. En la mayoría de estos, la base se encuentra agrietada producto del aumento de volumen que sufre la sección de madera embebida, como consecuencia de la acumulación de humedad en el interior. El hormigón no es capaz de

absorber las tensiones generadas dentro del material debido a los cambios de volumen que sufre la madera, lo que provoca la fractura de los mismos. Algunos pies derechos están más deteriorados que otros debido a que se emplearon maderas de diferente naturaleza, por lo cual varían sus capacidades de absorción y las tensiones ejercidas para cada caso.

3.2 Dimensionamiento y deformación a partir de los datos del TLS

La elevada precisión de los datos obtenidos por el escáner láser a partir de la unión de las nubes de punto y la obtención del modelo 3D, permite realizar las mediciones de los elementos del forjado sin necesidad de intervenir sobre ellos. Para trabajar con secciones representativas del mismo y los pies derechos, se establecieron regiones y se ajustaron las vistas para obtener imágenes medibles. En el caso del forjado de madera, se extrajo una sección entre las vigas 35 a la 49, mientras que para los elementos de soporte, se seleccionó una sección de los pies derechos 5 y 6. Los resultados se muestran en la figura 3. El resumen de las escuadrías se indica en la tabla 2.

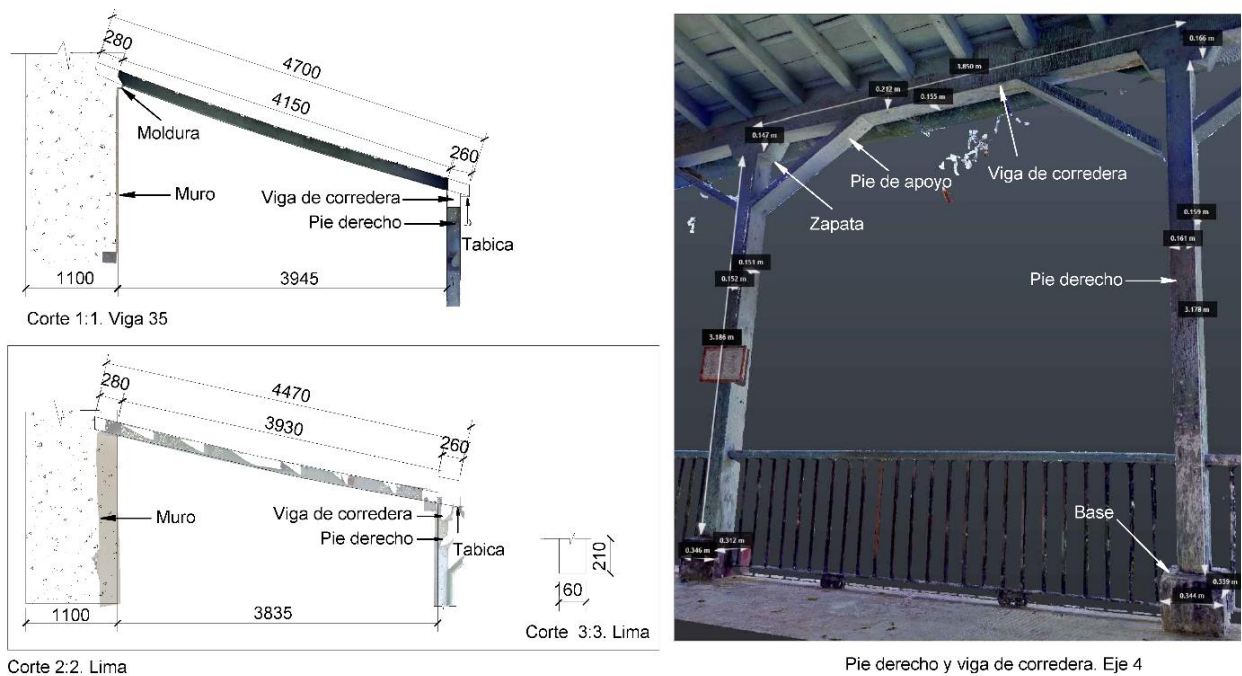


Figura 3. Dimensionamiento y deformación (en mm) de los elementos del forjado a partir de los modelos 3D

Tabla 2: Dimensiones generales de los elementos del forjado

Elemento	Base (cm)	Altura (cm)	Espaciamiento (cm)
Viga	9-10	13	43-45
Tabla	45-48	18-24	-
Tapajunta	45-48	5-6	31-38
Lima	16	21	-
Viga de corredera	15-16	21	-
Zapata	15-16	16-17	-
Pie de amigo	5	16	-
Pie derecho	15-16	334-372	360-370
Base del pie derecho	30-40	27-30	-

Para el análisis estructural de las vigas del forjado se extrajeron ortoimágenes empleando el software Reconstructor, y se realizaron cortes mediante el software Autodesk Recap desde la viga número 17 hasta la 98. Todas las vigas que conforman el forjado presentan en mayor o menor medida deformaciones (flecha), y algunas muestran fallos a flexión debido a la disminución de su capacidad portante. La norma cubana (NC 53-179:88, 1988), establece que la flecha máxima admisible es $\frac{1}{240}$ de la luz para la carga total. Esto indica que la flecha admisible para las vigas del forjado es aproximadamente 1.5 cm pero los valores obtenidos en obra superan de 2 cm a 4 cm los aceptables por cálculo. La norma establece que la flecha de las vigas aumentará para períodos de carga de más de 10 años en un 50% para madera seca, y un 100% en madera húmeda. Considerando esto, la flecha admisible aumentaría 2.25 cm y 3.0 cm respectivamente, para lo cual siguen existiendo diferencias entre valores permisibles y los reales (Figura 4). Es importante destacar que no todas las deformaciones máximas encontradas se localizan en el centro de la luz, debido a que existen zonas donde el elemento está más deteriorado que otras; es por ello que las vigas se deforman y fallan por el área más vulnerable. Se identificó que no todas las vigas son de la misma especie maderable, por lo cual también varían su dureza y resistencia a la flexión. En los pies derechos 1 y 7, el deterioro en la fagonadura ha provocado el desplazamiento del mismo y de todos los elementos que a él colindan. Estos movimientos verticales que han sufrido los pies derechos varían entre 3.5 cm - 20 cm aproximadamente, y la separación en el rayo de Júpiter entre las vigas que conforman la viga de corredera, oscila entre 1 cm - 2 cm, lo que representa desplazamientos considerables.

Para evaluar la deformación de las vigas y la densidad que presentan, se realizó la identificación de las especies maderables, a partir de la toma de muestras directamente de las vigas y pies derechos. Las especies de madera se identificaron en laboratorio biológico y las densidades obtenidas con penetrómetro, fueron comparadas con los valores de referencia reportados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agro-Forestales (INAF).

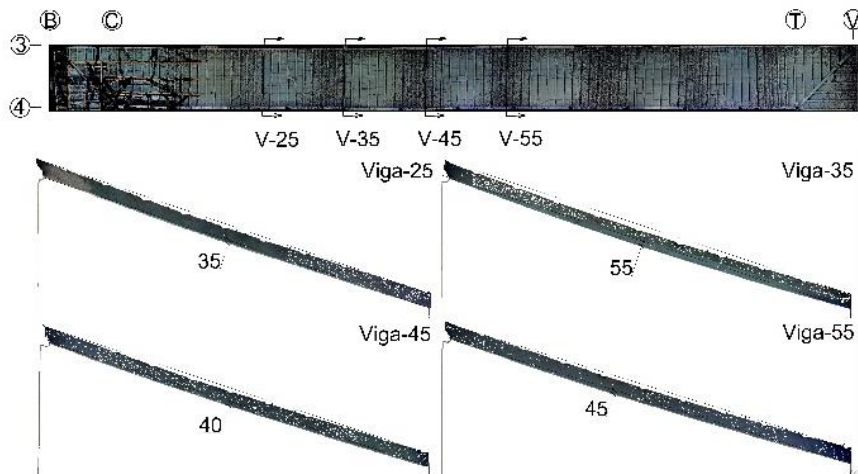


Figura 4. Deformaciones de algunas vigas del forjado (flecha en mm)

3.3 Especies maderables identificadas

Mediante la aplicación del método de anatomía comparada a partir de los cortes histológicos realizados en dirección transversal, tangencial y radial, se obtuvo como resultado que las especies de madera que forman la estructura del forjado y el sistema de apoyo de los pies derecho son: cedro (*Cedrela odorata*), pino (*Pinus sp.*), baría (*Cordia gerascantus*), caguairán (*Guibourtia himenifolia*) y ácana (*Manilkara grisebachii*). En la figura 5 se muestran los cortes histológicos realizados para la identificación de las especies de madera existentes.

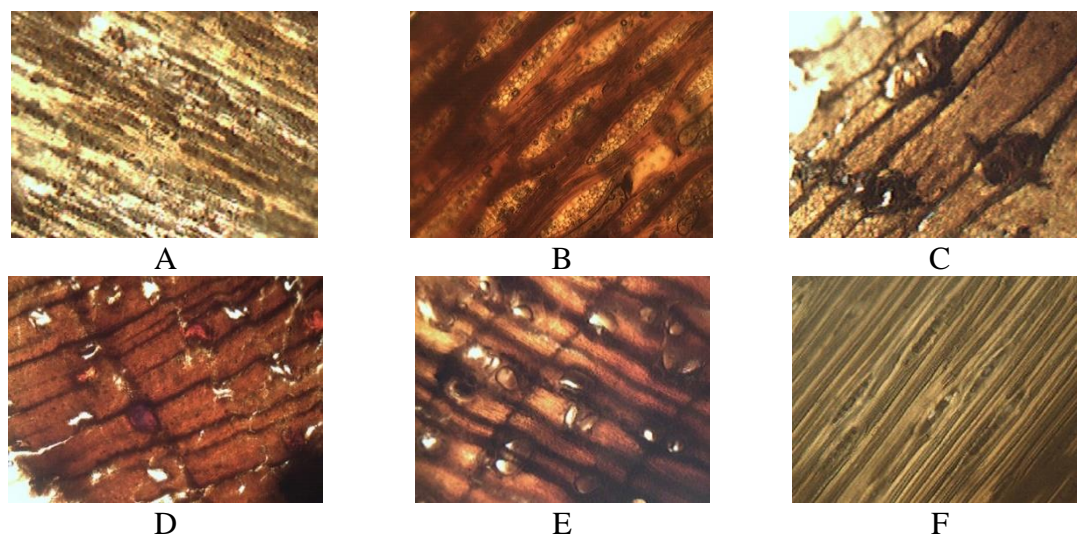


Figura 5. Cortes histológicos a 40x de las especies de madera identificadas: A- ácana (corte longitudinal), B- baría (corte longitudinal), C- caguairán (corte transversal), D- cedro (corte longitudinal), E- najesí (corte transversal), F- pino (corte longitudinal)

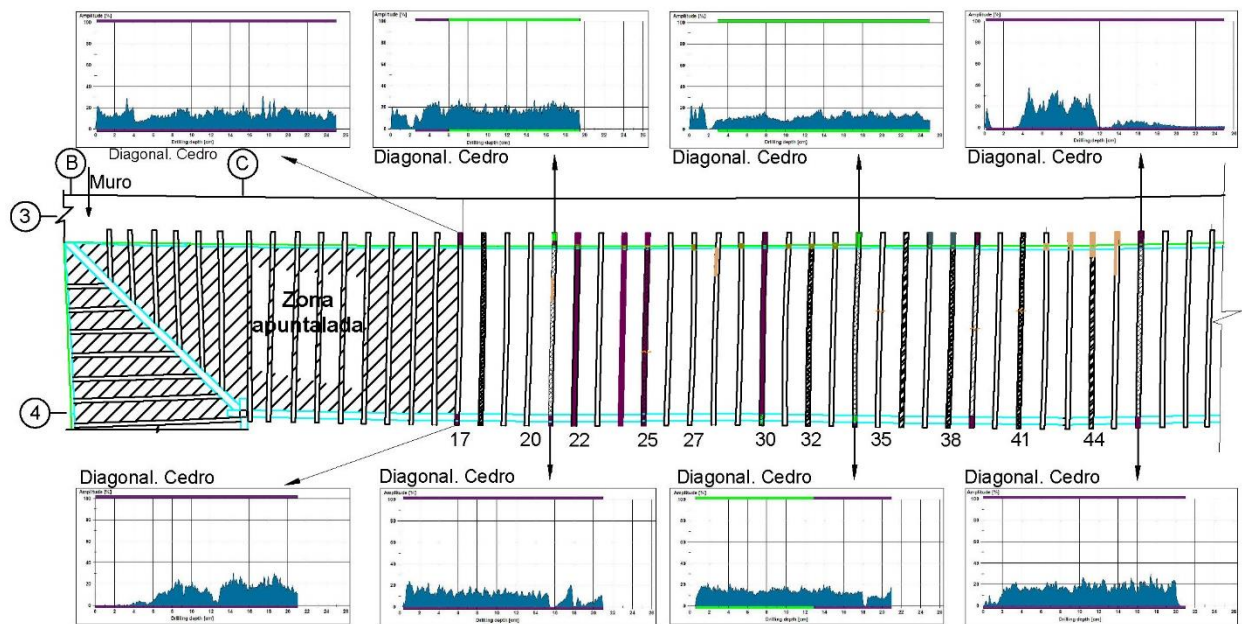
3.4 Análisis de los resultados del diagnóstico

Los contenidos de humedad medidos en las vigas del forjado se encuentran entre 9%-19%, en los pies derechos entre 11%-17% y la viga de corredera entre 11%-12%. Las imágenes termográficas obtenidas reflejaron como el muro de apoyo presenta zonas de elevada humedad, lo cual favorece la absorción de agua en la madera por ser un material higroscópico.

En el caso de los pies derechos y la viga de corredera, los elementos se encontraban parcialmente húmedos debido a que están expuestos a la luz solar y sus condiciones de secado y ventilación son más favorables que las de las vigas del forjado. Sin embargo, en tiempos de lluvia y eventos climáticos extremos, esta misma exposición provoca que el deterioro sea más acelerado y propicie la proliferación y ataque de organismos degradadores de la madera.

En el análisis con la cámara termográfica se identificaron cambios de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en distintos puntos de un mismo elemento, lo que conlleva a deformaciones térmicas en el forjado. En el caso de las vigas, los valores más fríos se encuentran cerca de las tablas y en el muro del eje 3, donde las diferencias más considerables aparecen en la zona apuntalada y próxima al forjado. Cuando llueve, el agua se infiltra principalmente por las zonas donde menor conservado se encuentra el sistema de impermeabilización y donde exista mayor presencia de planta invasoras, lo que provoca la acumulación del agua, tanto en el forjado como en el muro. El grado de saturación de los elementos de madera varía en función de la especie, el nivel de exposición y las condiciones ambientales, lo que conlleva a que se desencadenen procesos patológicos que debilitan sus propiedades mecánicas. Otras de las lesiones identificadas con la termografía fueron las variaciones de temperaturas en el piso, asociadas a desniveles o desperfectos que favorecen la acumulación del agua pluvial, y propician la absorción por capilaridad en los pies derechos de la galería. Al encontrarse embebidos en una base de concreto que funciona como una capa impermeable, el secado en el interior de la base es muy ineficiente y acelera la pudrición de la madera.

El análisis realizado con el resistógrafo permitió identificar que de las 98 vigas que conforman el forjado, 64 de ellas presentan diferentes manifestaciones patológicas asociadas a pudrición por exposición a ciclos de humectación y secado. La resistografía se inició en la zona de la fognadura debido a que es el área más vulnerable, y en función de los daños detectados se realizaron mediciones también en el centro de la luz o próximo a los apoyos (Figuras 6 y 7).



Leyenda:

- desfibramiento
- pudrición
- madera dañada
- ablandamiento
- grietas
- madera sana

Figura 6. Resultados de ensayos y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 1-49

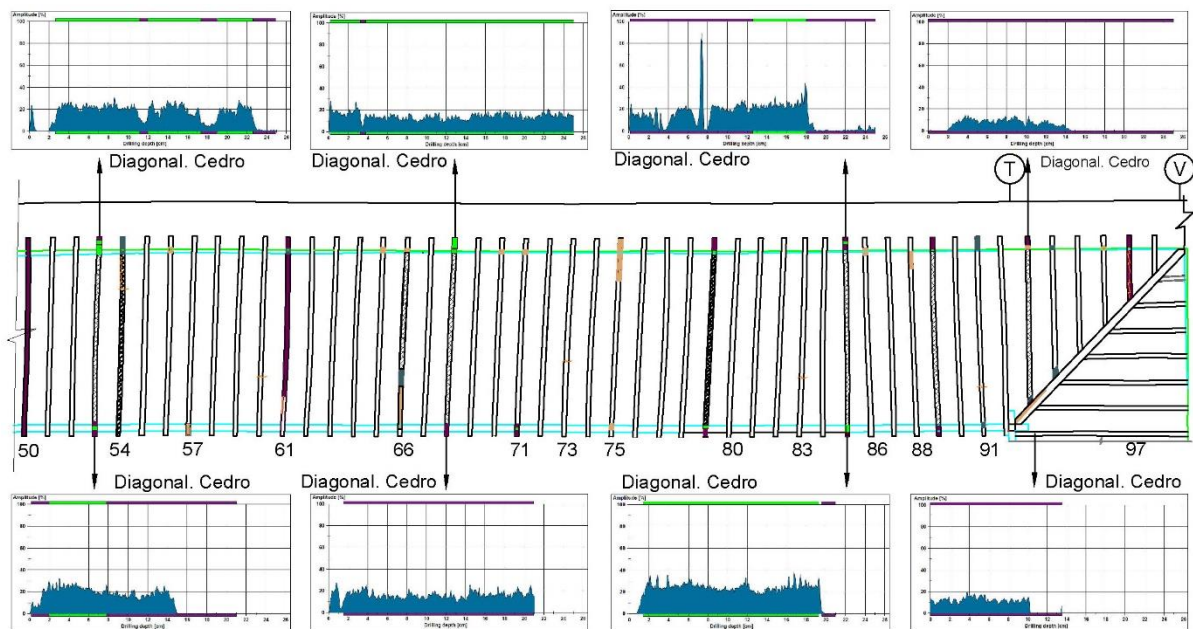


Figura 7. Resultados de ensayos de resistografía y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 50-98

En el caso de los pies derechos, la resistografía mostró para todos ellos valores bajos de resistencia a la penetración, y anomalías similares a las detectadas en las vigas de madera. La extensión de las lesiones se encuentra entre 150 mm y 750 mm desde la base de concreto hacia arriba, y en más del 50% de los pies derecho, esta se ubica en los primeros 150 mm de altura.

La viga de corredera, con una extensión de 45.5 m está conformada por tramos, y cada tramo por vigas de diferentes especies maderables. Debido a que la zona más vulnerable es la cara exterior,

se realizó la resistografía desde la cara interior (galería) hacia la exterior (patio), con el propósito de identificar el avance en el deterioro en función del ancho de la viga. En el tramo entre el pie derecho 8 y 9 la resistografía refleja zonas con desfibramiento debido al ataque de termitas. Estos organismos xilófagos se alimentan de la madera y dejan túneles en su interior, en consecuencia, la curva resistográfica cambia repentinamente debido a la falta de resistencia durante su avance (Figuras 8 y 9). Al realizar los ensayos de penetrómetro y los cálculos de ajuste correspondientes, se evaluó que los elementos de madera tienen una dureza inferior a los valores tabulados para las maderas cubanas. Estos resultados están en correspondencia con las bajas resistencias obtenidas en los ensayos de resistografía. En la tabla 3 se presenta una muestra de algunos elementos estudiados.

Tabla 3: Resultados del cálculo de la dureza a partir del penetrómetro

Elemento	Ubicación	Especie de madera	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	p12 tabulado* (g/cm ³)
Lima	Eje 3	Pino	14	14	0.35	0.74
Viga 30	Eje 4	Cedro	13	17	0.27	0.37
Viga 50	Eje 3	Cedro	13	21	0.16	0.37
Pie derecho 8	a 30 cm de la base	Pino	14	9.5	0.47	0.74
Pie derecho 9	a 30 cm de la base	Baría	13	11	0.43	0.84

*- valores de referencia aportados por el INAF

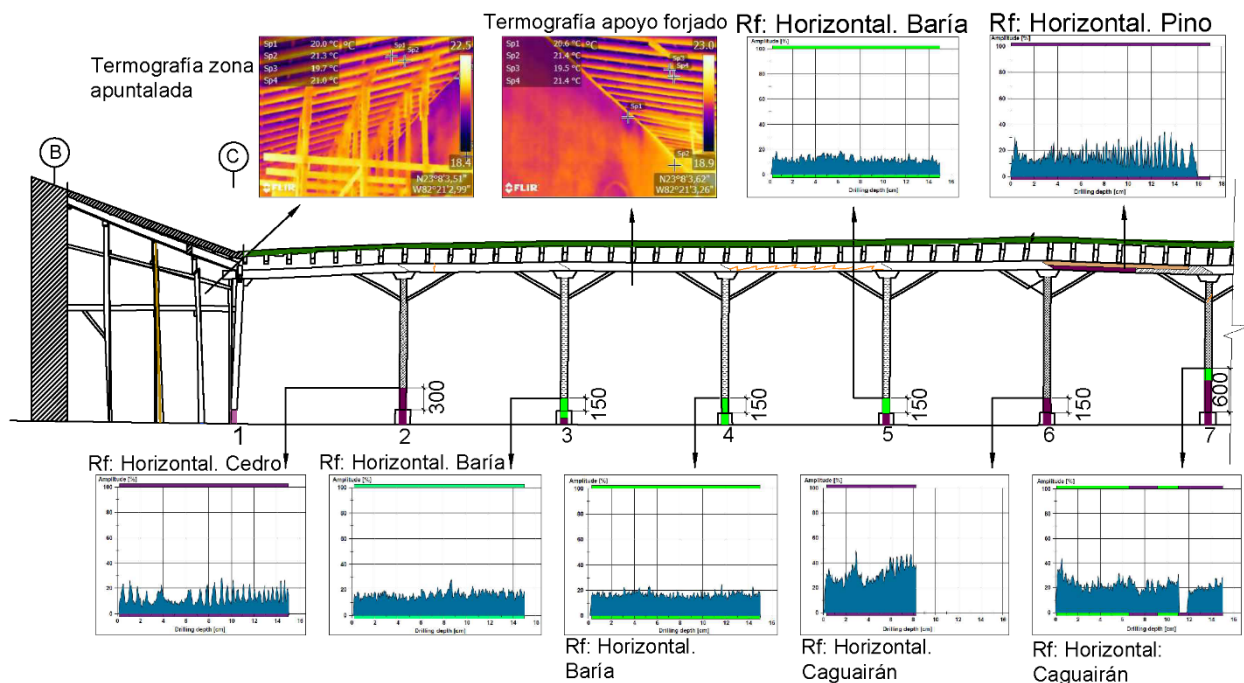


Figura 8. Resultados de ensayos en elementos del forjado entre pies derechos 1-7, donde la termografía refleja la humedad presente en el muro del eje 3 en la zona de apoyo de las vigas, y la resistografía en pies derechos y viga de corredera del eje 4.

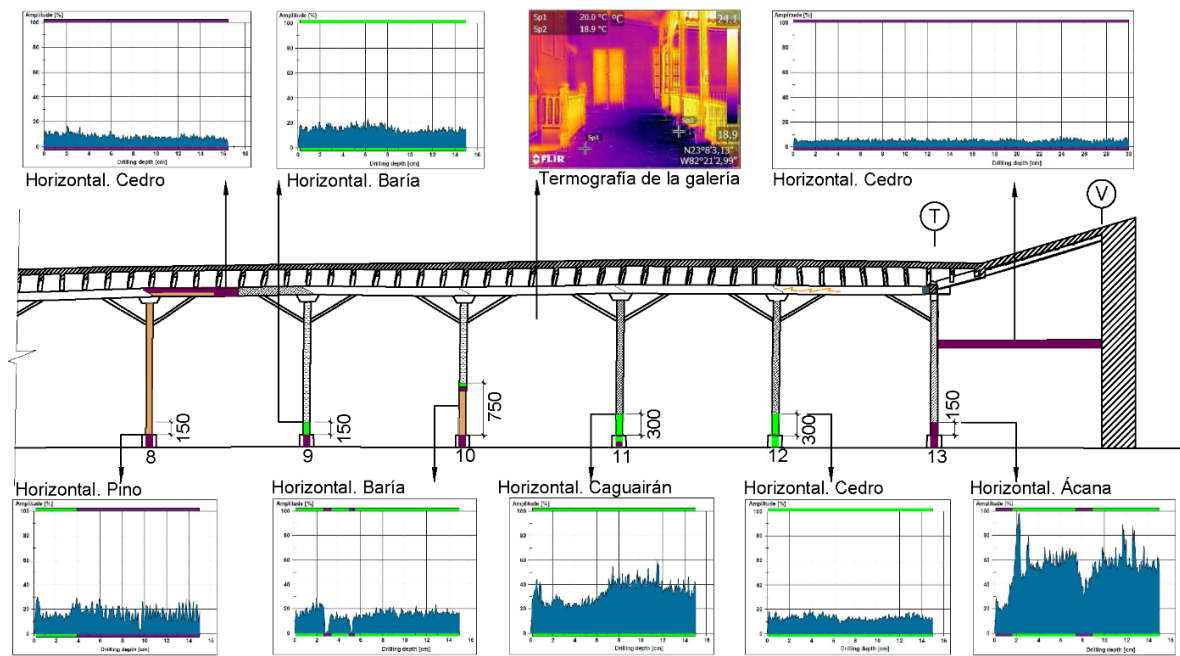


Figura 9. Resultados de ensayos en elementos del forjado entre pies derechos 8-13, donde se muestra la termografía de la galería con elevado nivel de humedad en los apoyos de los pies derechos, y la resistografía en pies derechos y viga de corredera del eje 4.

3.5 Propuestas de solución

En las vigas del forjado se determinó que 17 de ellas requieren ser sustituidas por su avanzado deterioro. Adicionalmente otras 45 vigas deberán ser reforzadas estructuralmente en diferentes zonas, en función de las patologías desarrolladas en cada una. De las 34 vigas restantes a las que no se le identificaron lesiones significativas, será necesario desmontar y decapar 2 de ellas debido a deterioros superficiales, para posteriormente recalcar la carga para la nueva sección de viga (Figuras 10 y 11). Todos los pies derechos mostraron deterioros que requieren acciones de reforzamiento estructural, así como en las vigas de corredera, donde será necesario la sustitución de dos tramos, y el reforzamiento de otros 3 tramos (Figuras 12 y 13). La disminución significativa de la densidad de las maderas del forjado es el resultado de la exposición a ciclos de humectación y secado, fundamentalmente en los meses de lluvia, con la consecuente proliferación de hongos e infestación de termitas. Las deformaciones presentes en las vigas no solo son el resultado del incremento del peso por exceso de agua y el crecimiento de plantas superiores, sino también debido a la pérdida de sus propiedades maderables, lo cual incrementa el riesgo de fallo estructural.

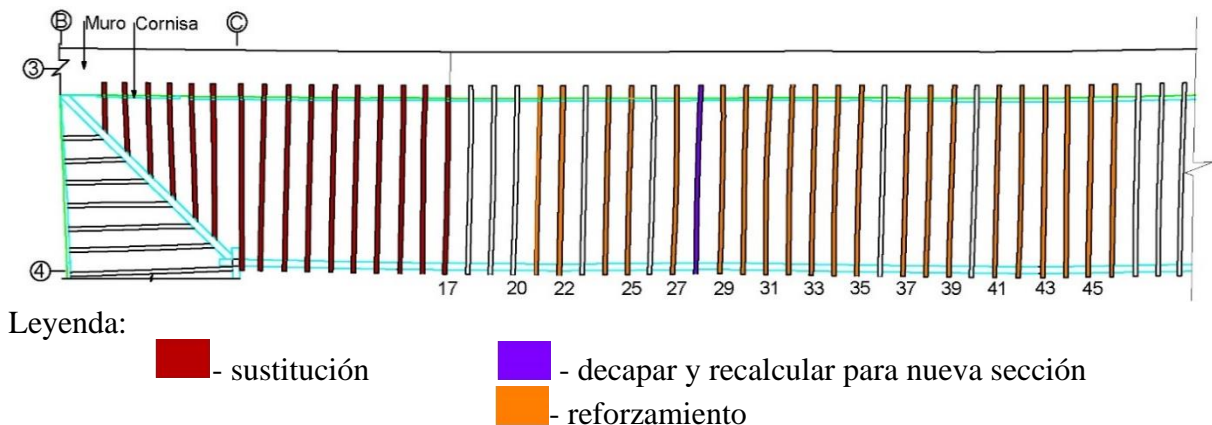


Figura 10. Propuesta de solución al forjado entre vigas 1-49

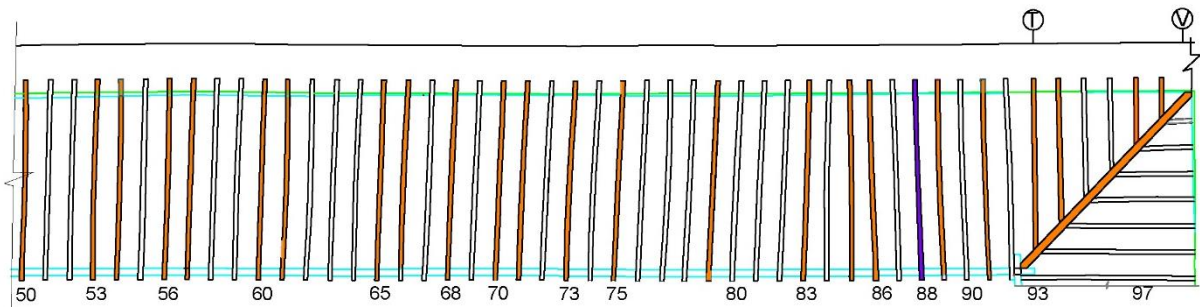


Figura 11. Propuesta de solución al forjado entre vigas 50-98

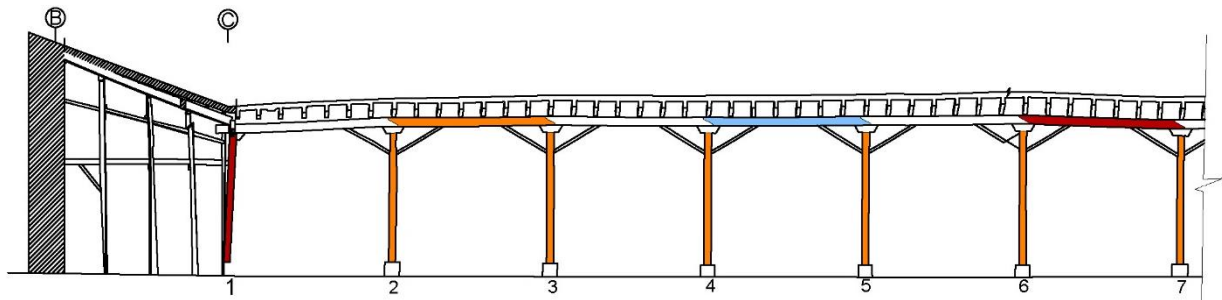


Figura 12. Propuesta de solución a los pies derechos 1-7 y sección de viga de corredera

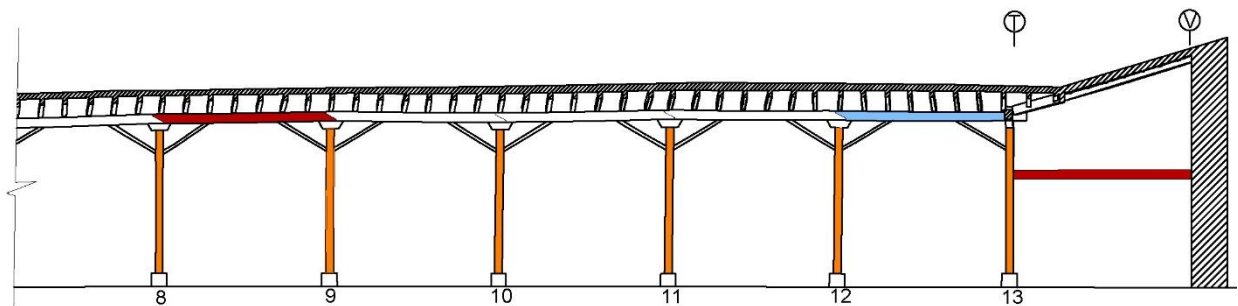


Figura 13. Propuesta de solución a los pies derechos 8-13 y sección de viga de corredera

4. CONCLUSIONES

La estructura del forjado de madera de la galería estudiada presenta un avanzado deterioro, provocado por pudrición debido al exceso de humedad producto del crecimiento de plantas invasoras sobre la cubierta. Esta situación propició la colonización por hongos y el ataque de organismos xilófagos, lo cual conllevó a pérdidas en las propiedades de las maderas empleadas. Los estudios de densidad aplicados mostraron afectaciones en la dureza debido a la exposición a ciclos de humectación y secado, y la colonización biológica. Esto conllevó a deformaciones en las vigas y la disminución de la capacidad portante de sus elementos estructurales.

Como resultado del diagnóstico realizado, se demostró la necesidad de sustituir 17 vigas de soporte de la cubierta y el refuerzo estructural de otras 45. Los pies derechos deberán igualmente ser reforzados, mientras uno de ellos tendrá que ser sustituido por avanzado deterioro, así como algunas secciones de viga de corredera.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento de esta investigación al Grupo Inversionista de Rehabilitación Patrimonial de la OHCH bajo contrato No. S-5AI/2020 Ccto. 22DG/2019. La misma

fue realizada con apoyo de la División de Materiales de la Fundación Tecnalia Research & Innovation bajo el proyecto de colaboración FOCAD 2018.

De igual manera se desea agradecer la participación de los especialistas y técnicos del Departamento de Diagnóstico y Levantamiento, en particular a los Ingenieros Rafael González Hernández y Dainelys Guerra Bouza por su considerable aportación, a todos los técnicos del Departamento de Diagnóstico y Levantamiento, así como a la Bióloga Maider Arana de la Fundación Tecnalia en la elaboración del plan de control y erradicación de termitas, y de la Cooperación Internacional a la Ing. Ingrid Alonso Esquivel.

6. BIBLIOGRAFÍA

Binda, L., Saisi, A. (2009), *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France.

Guevara, J. L., Toirac, Y. A., Marisy, C. M. C. (2019), *Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención*. Revista ALCONPAT, 9(2): 228-246. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>

Hasníková, H., Kuklík, P. (2014), *Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure*. Wood research, 59(3): 411-420.

Helal, J., Sofi, M., Mendis, P. (2015), *Non-destructive testing of concrete: A review of methods*. Electronic Journal of Structural Engineering, 14(1): 97-105.

Kherais, M., Csébfalvi, A., Len, A. (2021), *The climate impact on timber structures*. International journal of optimization in civil engineering, 11(1): 143-154.

Kloiber, M. (2007), *"Ensayos no destructivos de las propiedades de la madera"*, Mendel University, Czech Republic, 208 pp.

Kuklík, P. (2007), *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.

Kumar, P., Imam, B., (2013), *Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure*. Science of The Total Environment, 444: 85-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>

Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>

Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., Rubio de Hita, P. (2013), *Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study*. Advanced Materials Research, 778: 233-242. [10.4028/www.scientific.net/AMR.778.233](http://www.scientific.net/AMR.778.233)

Norma Cubana (1988), *NC 53-179:88 - Estructuras de madera. Método de cálculo*. La Habana, Cuba.

Ortega, N. F., Ripani, M. (2007), *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007. Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales (AAENDE), Argentina, pp. 1-12.

Ortiz, R., Fuentes, N., Jamet, A., Moya, A., González, M., Varela, M. P., Ramírez, A., Adofacci, G., Martínez, P. (2017), *Evaluación resistográfica en elementos de maderas desfibradas de la torre de lixiviación de la oficina salitrera Santa Laura en Chile*. Patrimonio de la Humanidad. Informes de la Construcción, 69(547): 1-6. <http://dx.doi.org/10.3989/id54678>

Palaia, L., Monfort, J., Sánchez, R., Gil, L., Álvarez, A., López, V., Tormo, S., Pérez, C., Navarro, P. (2008), *"Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones"*. 9th International Conference on NDT of Art. Jerusalem, Israel.

- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021), *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change: e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>
- Tucci, G., Bonora, V. (2017), *Towers in San Gimignano: metric survey approach*. Journal of performance of constructed facilities, 31(6). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001085](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001085)
- Workman, G. L., Moore, P. O. (2012), "*Nondestructive Testing Handbook 10: Overview*". American Society for Nondestructive Testing.