

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

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Presidente

Carmen Andrade Perdrrix, **España**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Iván Escalante García, **México**

Vicepresidente Técnico

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Vicepresidente Administrativo Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

Gestor

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:

Arq. Margita Kliewer
Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”
Asuncion, **Paraguay**

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas 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.

Dr. Mauricio López.

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

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 Mexicano del Transporte / Universidad Marista de
Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –
INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

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 noveno año.

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

Esta edición V9N2, inicia con un trabajo procedente de **Brasil**, donde Graziela Pereira da Silva y colegas, presentan la influencia de la termografía infrarroja en paredes de albañilería para detectar manifestaciones patológicas. Se realizó una revisión bibliográfica con selección y cribado de artículos. Se revisaron las propiedades térmicas y su comportamiento, puentes térmicos, diferencia de temperatura e infiltraciones de aire. Se detectaron los cuidados reportados durante la ejecución de los experimentos y mediciones. Además, se demostró que la termografía infrarroja es una técnica simple y precisa.

En el segundo trabajo, procedente de **México**, Pedro Jesús Poot Cauch y colegas abordan la mecánica de la adhesión, el efecto de reforzamiento y la durabilidad de las aplicaciones de materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) en vigas. La aplicación de los materiales de CFRP se ha descrito ampliamente, pero el enfoque principal se ha centrado en los parámetros generales de falla. El primer problema es el fortalecimiento de la capacidad del refuerzo de CFRP para vigas de concreto. El segundo es la relación local tensión-deslizamiento del enlace de la interfaz, es decir, el deslizamiento local. El último problema es la durabilidad de la hoja/placa de CFRP, cuando se expone a un ambiente hidrotérmico. El papel y la mecánica de la adhesión de concreto-CFRP y una buena comprensión de la interfaz entre el CFRP y el comportamiento del concreto son el factor clave para controlar las fallas de desunión en vigas de concreto reforzadas con CFRP.

El tercer trabajo de este número es de **Brasil**, donde Ronaldo Medeiros-Junior y colegas confrontan las siguientes propiedades del concreto: absorción de agua (por inmersión y capilaridad), resistividad eléctrica y resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que los concretos con mayor contenido de puzolana presentan mayor resistividad y absorción por capilaridad, para la relación agua-cemento menor que 0.60. Ese comportamiento es atribuido a la reducción en el diámetro de los poros. No obstante, para la relación agua-cemento de 0.60, concretos con menor contenido de puzolana presentaron mayor absorción por capilaridad. Además, la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica son

inversamente proporcionales a la relación agua/cemento, en cuanto a que la absorción por inmersión y capilaridad son directamente proporcionales a la relación agua/cemento. Se encontraron correlaciones con elevados coeficientes de determinación.

En el cuarto artículo procedente de **México**, José Trinidad Pérez-Quiroz y colegas evaluaron el desempeño frente a la corrosión de uniones soldadas disimiles, utilizando como metales base acero al carbono ASTM A 615 y acero inoxidable austenítico AISI 304, y como metal de aporte electrodo ER-309L, se utilizó bisel simple a 45°. La mitad de los especímenes fueron sometidos a un proceso de “mantequillado” utilizando electrodo Inconel 182. Los resultados electroquímicos muestran que, a pesar de los defectos presentados en la unión soldada, estas tienden a pasivarse en medio alcalino, siendo las probetas con mantequillado las menos deterioradas por efecto de la corrosión y su resistencia mecánica no se ve minimizada.

El quinto artículo, de Daniel V. Ribeiro y Rafaela Oliveira Rey, proviene de **Brasil**; ellos evaluaron las condiciones de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la reacción álcali/agregado (RAA), utilizando adiciones minerales, a fin de mitigar esa reacción. Se utilizó el método acelerado de barras de mortero, especificado por la NBR 15577-4: 2008. Los resultados indican que las arenas de la región metropolitana de Salvador presentan baja reactividad, sin embargo, las gravas presentaron alta reactividad. Este estudio, a pesar de limitarse a las condiciones utilizadas, es inédito en el Estado de Bahía y presenta un elevado índice de originalidad por utilizar contenidos de adiciones superiores a las convencionales. Se concluyó que la microsílíce, si se utiliza en niveles muy elevados, puede incluso, acelerar la reacción.

El sexto trabajo de este número lo escriben M. Rendón Belmonte y colegas de **México**, ellos describen propiedades referentes a la durabilidad de cinco mezclas de concreto con distintos contenidos de ceniza volante activada (CVA) y cemento portland compuesto tipo CPC 40. Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica aparente, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión. Los resultados indicaron que la calidad de todas las mezclas resultó durable, el desarrollo de la resistividad eléctrica y disminución del nivel de permeabilidad al ión cloruro fue favorecido por el contenido de CVA. En cuanto a las resistencias a la compresión, se notó que a mayor contenido de CVA éstas resultaron menores. El porcentaje máximo de sustitución de CVA para cumplir con los criterios de durabilidad actuales resultó del 65%.

En el séptimo trabajo, procedente de **Brasil**, Denis Cardoso Parente y colegas evalúan la utilización del agua de reúso proveniente de estaciones de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de bloques huecos de concreto simple. El uso de esos bloques ha sido adoptado como opción de racionalización de la composición de la albañilería para mampostería

tradicional y estructural, por permitir reducción de pérdidas de materiales y capas de revestimiento. El estudio comprende el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los bloques dosificados con el efluente y los resultados muestran que esas propiedades permanecen inalteradas, lo que puede viabilizar la utilización del efluente.

En el octavo trabajo, procedente de **Cuba**, Jennifer López Guevara y colegas reportan que la armadura del Coro alto del Convento de Santa Clara de Asís ha sido víctima de la humedad y del ataque de agentes bióticos y abióticos que han provocado su paulatina degradación. Para la identificación de los procesos patológicos asociados a estos agentes y por su carácter patrimonial se realizó un estudio de diagnóstico basado en una inspección organoléptica y en ensayos superficiales con el instrumental disponible, que permitieron identificar las causas. Mediante la modelación de la estructura en el programa SAP 2000 se obtuvieron las solicitaciones a las que se encuentran sometidos los elementos a intervenir y con el resultado se calcularon las soluciones propuestas para los problemas patológicos identificados, fundamentalmente para la pérdida del vínculo entre la solera y el tirante.

El artículo que cierra la edición es de Henrique Jorge Nery Lima y colegas de **Brasil**, quienes presentan un estudio de casos de manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón, ubicadas en el Eje Rodoviario Norte de Brasilia, por medio de la metodología GDE / UnB, que califica y cuantifica la degradación de daños estructurales. Se realizó la caracterización del estado general de la estructura con la finalidad de servir de subsidio para tomas de decisiones en cuanto a intervenciones rutinarias, para ampliar la vida útil de la estructura. La rutina metodológica consistió en la realización de inspecciones en campo, preparación de un catálogo de las manifestaciones patológicas estructurales con levantamiento fotográfico caracterización de las manifestaciones patológicas, clasificación según los factores de ponderación y factores de intensidad de daños de la estructura conforme a la metodología GDE / UnB para obras de arte especiales, cálculo, y clasificación global de los daños de la estructura.

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



CONTENIDO

REVISIÓN

- | | Página |
|---|---------------|
| G. P. Silva, P. I. B. Batista, Y. V. Povóas: Uso de termografía infrarroja para estudiar el desempeño térmico de paredes: una revisión bibliográfica. | 117 - 129 |
| P. J. Poot Cauch, R. Martínez-Molina, J. L. Gamboa Marrufo, P. J. Herrera Franco: Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) - Una revisión. | 130 - 151 |

INVESTIGACIÓN BÁSICA

- | | |
|--|-----------|
| R. A. Medeiros-Junior, G. S. Munhoz, M. H. F. Medeiros: Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana. | 152 - 166 |
| J. C. I Ramirez -Soto, J. T. Pérez-Quiroz, J. M. Salgado-López, M. Martínez-Madrid, T. Pérez-López, M. Rendón-Belmonte, E. Alvarez-Alfaro: Comportamiento electroquímico de uniones disimiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantecillado con Inconel 182 y sin enmantecillado. | 167 - 184 |
| D. V. Ribeiro, R. O. Rey: Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de Reacción Alkali-Agregado (RAA). | 185 - 199 |
| M. Rendón Belmonte, M. Martínez Madrid, R. V. Martínez Pérez, J. T. Pérez Quiroz: Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada. | 200 - 214 |
| A. Plaza Meurer, R. Alves Amorim, L. Carvalho Quintanilha, D. Cardoso Parente: Reutilización de efluentes en la fabricación de bloques de concreto para albañilería. | 215 - 227 |

CASOS DE ESTUDIO

- | | |
|--|-----------|
| J. L. Guevara, Y. A. Toirac, C. M. C. Marisy: Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención. | 228 - 246 |
| H. J. N. Lima, R. S. Ribeiro, R. A. Palhares, G. S. S. A. Melo: Análise de manifestações patológicas do concreto em viadutos urbanos. | 247 - 259 |

Uso de termografía infrarroja para estudiar el desempeño térmico de paredes: una revisión bibliográfica

G. P. Silva^{1*} , P. I. B. Batista¹ , Y. V. Povóas¹ 

*Autor de Contacto: graziela.ps04@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.341>

Recepción: 05/08/2018 | Aceptación: 09/11/2018 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Paulo Helene

RESUMEN

Este artículo tiene por objetivo presentar la influencia de la termografía infrarroja en paredes de albañilería para detectar manifestaciones patológicas. Se realizó una revisión sistemática a través de investigación con búsqueda automática y snow-balling, selección y cribado de los artículos para restringir los artículos al tema deseado. Después de esto, fue estudiado sobre la termografía infrarroja en las manifestaciones patológicas, las propiedades térmicas y su comportamiento, puentes térmicos, diferencia de temperatura e infiltraciones de aire. En general es necesario tener algunos cuidados durante la ejecución de los experimentos y mediciones. Además, se ha demostrado que la termografía infrarroja es una técnica compleja y precisa de ser utilizada.

Palabras clave: termografía infrarroja; rendimiento térmico; manifestaciones patológicas; propiedades térmicas; fugas de aire.

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

¹ Universidade de Pernambuco, Brasil.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

The usage of infrared thermography to study thermal performance of walls: a bibliographic review

ABSTRACT

This article aims to present the influence of infrared thermography on masonry walls to detect pathological manifestations. A systematic review was carried out through research with automatic search and snow-balling, selection and sifting of articles to restrict them to the desired theme. After that, infrared thermography in the pathological manifestations was studied along with the thermal properties and their behavior, thermal bridges, temperature difference and air infiltrations. In general, some care must be taken during the execution of experiments and measurements. It has also been shown that infrared thermography is a complex technique and should be used.

Keywords: infrared thermography; thermal performance; pathological manifestations; thermal properties; air leaks.

O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar a utilização da termografia infravermelha em paredes de alvenaria no auxílio do desempenho térmico. Foi realizado uma revisão sistemática através de pesquisa com busca automática e snow-balling, seleção e peneiramento dos artigos para restringir os artigos ao tema desejado. Após isto, foi estudado sobre a termografia infravermelha nas manifestações patológicas, as propriedades térmicas e seu comportamento, pontes térmicas, diferença de temperatura e infiltrações de ar. De uma forma geral é necessário ter alguns cuidados durante a execução dos experimentos e medições. Ademais foi mostrado que a termografia infravermelha é uma técnica complexa e precisa de ser utilizada.

Palavras-chave: termografia infravermelha; desempenho térmico; manifestações patológicas; propriedades térmicas; vazamentos de ar.

1. INTRODUCCIÓN

Las paredes pueden ser evaluadas a fin de verificar una mejor calidad para el desempeño térmico. Hay diversas formas de medición de acuerdo con la funcionalidad o parámetro que desee ser observado, entre ellas: resistencia mecánica, absorción de agua, capilaridad, desempeño térmico, características geométricas, etc., son algunos aspectos que pueden ser evaluados para la obtención de un desempeño satisfactorio de las paredes de una edificación.

La Norma de Desempeño 15575 (ABNT, 2013) y la norma base sobre Desempeño térmico 15220 (ABNT, 2005) se complementan pues la primera define desempeño como “comportamiento en uso de una edificación y de sus sistemas” y la segunda los conceptos térmicos, propiedades y sus cálculos.

La termografía infrarroja es una técnica de inspección no invasiva y no destructiva. Su captura es hecha a través de aparatos que muestran la radiación infrarroja, a través de mecanismos de fácil utilización, rápida y de forma compleja. La utilización de la técnica se ha hecho más común gracias a su naturaleza rápida, precisa y sin contacto que permite ser utilizada en una amplia gama de casos (Kylili et al., 2014). La termografía infrarroja utiliza una cámara para medir la radiación infrarroja emitida de un objeto y convertir en un patrón de radiación térmica, que es invisible al ojo humano, en una imagen visible (Clark et al., 2003).

Muchos investigadores han usado las técnicas de termografía infrarroja para diversas utilidades (Bagavathiappan et al., 2013) como, por ejemplo, medición de la emisividad, determinación del

coeficiente global de transferencia de calor, entre aplicaciones, demostrando así que esto tiene un potencial positivo (Porrás-Amores et al., 2013). O’Grady (2017a) trae como dato importante en su investigación: cerca de 40% de la energía consumida en Europa proviene de edificaciones. El estudio previo del comportamiento térmico de las paredes evita errores en la fase de construcción. Después de construido, su verificación *in loco* permite encontrar posibles fallas y/o deficiencias de proyecto que llevan a una reducción de su desempeño térmico.

En Argentina, cerca de un tercio de la energía producida es para el gerenciamiento de los edificios, siendo que la mitad de esta es direccionada para calentamiento y enfriamiento y más de 30% restante es perdido por aislamiento térmico insuficiente o tejados y paredes que tiene una tendencia a presentar supercalentamiento en verano y escapes de calor en invierno (Marino et al., 2016).

De acuerdo con la Green Building Council Brasil (2015) tomando como base el balance energético nacional de 2015, de toda la energía eléctrica demandada, cerca de 50% era para edificaciones. Además de esto, el consumo de energía eléctrica en Brasil, excluyendo las pérdidas, llega a 516,6 TWh, de este valor 258 TWh, o el equivalente a R\$ 60 billones son consumidos apenas por las edificaciones. Según la EIA (2018) en Estados Unidos en el 2017, alrededor de 39% de la energía total producida fue consumida por residencias y sectores comerciales. En los países de la Unión Europea, el sector terciario y residencial consume cerca de 41% de toda la energía producida, siendo que 55% es calor. Similarmente en Sérvia, donde cerca de 50% de la energía total consumida va para las edificaciones, solamente que el 60% de ella es calor (Tanic et al., 2015). Ante esas informaciones, se nota la gran importancia del estudio del comportamiento térmico de paredes.

Las edificaciones rurales en China consumen mucha energía y tiene un desempeño térmico pobre debido al tipo de estado de los materiales de construcción (Diao et al., 2018). Entonces, la detección y cuantificación de las pérdidas de calor a través de las edificaciones se vuelven relevantes por ser un tema de extrema importancia para la sociedad.

Existe aún una carencia de estudios sobre el asunto, dificultando la investigación y un mejor entendimiento sobre el alcance de la termografía infrarroja. Por ser un asunto que tiene más de 25 años de investigaciones relevantes, investigadores están invirtiendo en este tema intencionalmente para explorar toda la extensión de la utilización de la termografía infrarroja. Debido a esto, este trabajo tiene por objetivo realizar una revisión sistemática de los trabajos existentes sobre la utilización de la termografía infrarroja para el conocimiento de los parámetros, sus propiedades y su influencia en el desempeño térmico de paredes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico de la termografía infrarroja

La termografía infrarroja comenzó a ser utilizada para otros fines y no para la construcción civil. En sus principios fueron descubiertos por casualidad en cuanto se intentaba solucionar un problema astronómico, alrededor de 1800, por el científico William Herchel (Barr, 1961), siendo perfeccionado para su utilización en diversos sectores a lo largo de los años (Lucchi, 2018). En los años 1830, el investigador italiano, Melloni, descubrió que la sal (NaCl) en cristales naturales grandes o suficientes para ser transformados en lentes y prismas, se convirtió en el principal infrarrojo hasta la década de 1930, cuando llegó la era del cristal sintético (Flir, 2017). El primer detector cuántico fue desarrollado entre 1870 y 1920 basado en las interacciones entre las radiaciones, aumentando la precisión y reduciendo considerablemente el tiempo de respuesta (Smith et al., 1958). La termografía fue más perfeccionada durante la segunda guerra mundial, mostrando la importancia de la tecnología principalmente en la noche y su ampliación del uso de las imágenes infrarrojas en el sector de la construcción surgió alrededor del año 2000, con el uso de titanato de bario-estroncio y microbolometro (Lucchi, 2018). Su uso aumentó drásticamente en los últimos años principalmente en obras de restauración, construcción de edificios e inspecciones

(Kylili et al., 2014; Bianchi et al., 2014) debido a las mejoras físicas y tecnológicas, como reducción del tamaño del equipo, reducción de costos y mejoras en la resolución, sensibilidad y precisión, operacionalidad y portabilidad (Meola, 2012). La utilización ha crecido bastante en los últimos 15 años, principalmente para la ingeniería civil y restauraciones de edificios históricos, facilitando así una difusión de las leyes europeas no solo para la eficiencia energética, sino también para la auditoría energética de las edificaciones (Lucchi, 2018). Mucho se ha aprendido con la termografía infrarroja, sin embargo, aún transcurridos más de 30 años desde el inicio de su utilización, aún no ha tenido toda su extensión explorada (Grinzato et al., 2002; Albatici y Tonelli, 2010).

2.2 Normalización de la termografía infrarroja en el Brasil y en el mundo

Alrededor del mundo, la utilización de la termografía infrarroja ha sido difundida hace algunos años. Tanto que ya existen normas como las de ASTM, ISO y de la Unión Europea, que regulan la utilización de la termografía infrarroja en edificaciones, sus propiedades y su uso es ampliamente recomendada (ASTM, 2013a; ASTM, 2015a; ASTM, 2013b, ASTM, 2015b; ISO, 2008; ISO, 2015; EN, 1999).

En Brasil no hay una norma que regularmente el uso, teniendo muchas veces que recurrir a normas internacionales o adaptaciones de uso en otras áreas.

La norma brasilera que tiene algún aspecto con el uso de la termografía infrarroja es la NBR 15575 – Norma de Desempeño (ABNT, 2013a), la cual es dividida en 6 partes y habla sobre los aspectos para un buen desempeño de la edificación, inclusive el térmico. Por tanto, no hace referencia a ningún ensayo de campo para la verificación de estos desempeños. Algunas normas brasileñas que hacen referencia a termografía infrarroja, entre ellas se destaca la NBR 15572 (ABNT, 2013b), NBR 15763 (ABNT, 2009) y NBR 15866 (ABNT, 2010), que abordan las técnicas para su utilización.

Según Marques y Chavatal, (2013) el comportamiento térmico de una casa depende sustancialmente de la interacción entre las paredes externas, techo y piso. Hoy en día, alrededor del mundo, las paredes son construidas con varios materiales en diversas capas (Robinson et al., 2017). En Brasil, gran parte de las edificaciones aún usan los materiales tradicionales, como concreto, bloques cerámicos y yeso. Todavía, actualmente los investigadores están explorando otros materiales como EVA (Silva et al., 2012) y fibras vegetales (Savastano Junior y Pimentel, 2000), en diferentes porcentajes, insertados en los materiales tradicionales, para ayudar en su comportamiento sin retirar sus características.

2.3 Metodología

De acuerdo con Maldague (2001), la termografía infrarroja está dividida en dos técnicas principales, la activa y la pasiva. Lerma et al. (2018) dice que las técnicas no entran en contacto con el sustrato a fin de evitar daños o recuperaciones a futuro.

La técnica pasiva es aquella en la cual la medición de la temperatura es hecha en condiciones normales, objetos que tienen energía térmica propia o de alguna forma almacenan energía por una fuente natural de calor, existiendo una diferencia de temperatura entre el objeto estudiado y el medio (Kylili et al., 2014; Viégas, 2015). En la técnica de termografía infrarroja activa, es necesario una fuente externa de energía artificial, generando una variación de temperatura sobre el objeto (Viégas, 2015). La utilización de la termografía pasiva irá a depender de la energía disponible en la naturaleza, pudiendo muchas veces sufrir inferencia del viento, sombra, condiciones climáticas y ambientales. Como el principio de la termografía activa es la utilización de fuentes de calor artificial, el uso de bombillos en el ambiente puede ser considerado una alternativa.

Dentro de la termografía activa existen algunas técnicas que se diferencian por la naturaleza de los estímulos aplicados siendo por bombillos de calentamiento o por ondas elásticas, también llamadas de ultrasonido (Kylili et al., 2014), siendo así denominadas de *Pulsed*, *Lock-in*, *Pulsed-Phase* (Maldague, 2001 apud Rocha, Póvoas, 2017), *Laser Spot Array Thermography* (Pei et al., 2016), *Principal Component Thermography* (Milovanovic et al., 2016; Rajic, 2002), entre otros.

Desde el inicio la utilización de la termografía infrarroja en la construcción civil ha sido utilizada en el monitoreo de edificaciones tanto de forma cuantitativa cuanto cualitativa (Grinzato et al., 2002). El análisis cualitativo es considerado una técnica de la termografía infrarroja que ofrece informes instantáneos, pues el enfoque de ella es el perfil y no sus valores (ITC, 2014 apud Viégas, 2015), siendo una comparación del valor relativo al acceso local en relación con un punto de referencia (Bagavathiappan et al., 2013).

En la termografía cuantitativa es posible definir la seriedad de la situación del objeto estudiado, siendo siempre el segundo análisis por hacer, pues la primera debe ser la cualitativa, dado que el análisis cuantitativo permite la cuantificación numérica de los parámetros que están siendo evaluados. Si no fue hecho de esta forma, está siendo hecho solamente el análisis comparativo (ITC, 2014 apud Viégas, 2015). El análisis cuantitativo de los datos permite una determinación precisa de la temperatura de un punto o de una región (Bagavathiappan et al., 2013).

Dentro del tipo de análisis hecho, diversos métodos son utilizados para medir el desempeño térmico de las edificaciones como el Laser spot thermography (LST) (Pei et al., 2016), heat flux meters (HFM) (Danielsky y Fröling, 2015), técnica de termovisión infrarroja (Albatici y Tonelli, 2010), entre otros.

Esas técnicas son utilizadas para la medición de puentes térmicos (O'grady, 2017a; Bianchi et al., 2014; Brás et al., 2014), infiltración de aire (Lerma et al., 2018), transmitancia térmica (Simões et al., 2014; Donatelli et al. 2016), emisividad térmica (Abatici et al., 2013; Ciocia y Marinetti, 2012), y otras propiedades.

A diferencia de los materiales y de la humedad presente en ellos, de la emisividad a ser analizada, los ruidos causados por las lecturas de temperatura reflexivas son algunos de los factores que interfieren en el análisis de la termografía infrarroja.

3. DESEMPEÑO TÉRMICO DE LAS PAREDES

El calentamiento global ha traído un creciente aumento de la temperatura. Al observar este hecho, el sector de la construcción civil busca mejoras en la eficiencia energética a través de alternativas que eviten el desconfort térmico de las edificaciones (Cani et al., 2012). La Directiva Europea 2010/31/ UE (European Parliament and of the Council, 2010) trae una descripción sobre como la eficiencia energética de los edificios ejerce un papel planificado en la obtención del consumo casi cero. Aversa et al. (2017) dice que “para que esto ocurra, el análisis o la auditoría energética es una herramienta eficaz y rápida para nuevas construcciones, proyectos y en la toma de medidas sobre la renovación energética de los edificios existentes que generalmente son caracterizados por ineficiencia que llevan al desperdicio de energía”. Debido al lanzamiento de la Norma de Desempeño en Brasil, la NBR 15575 (ABNT, 2013), cada vez más en cuenta el confort térmico. Este confort térmico es definido como la condición de la mente que expresa la satisfacción del usuario con un ambiente (Ghahramani et al., 2018).

3.1 Escapes de aire

Lerma et al. (2018) realizaron un trabajo con el objetivo de promover una discusión sobre las oportunidades y restricciones de usar la termografía infrarroja activa para detectar escapes de aire. El potencial es evaluado tanto de forma cualitativa, comparando los termogramas de la termografía infrarroja pasiva con la activa. Además de hacerla cuantitativa, se probaron los métodos de interpretar numéricamente los termogramas. Fue realizado el experimento en un cuarto de una construcción de 1980, en el Noroeste de Portugal. El experimento fue realizado durante 8 días con condiciones climáticas diferentes y la medición fue hecha tanto del lado interno como externo. En el análisis cualitativo, fue detectado, en el enfoque activo, que las infiltraciones de aire empiezan a ser visibles cuando la diferencia de presión es de 25 Pa, y en el enfoque pasivo, la diferencia de presión precisa ser mayor para ocurrir escapes. En el análisis cuantitativo fueron usados dos

diferentes posiciones de la cámara para la detección de los escapes de aire, la cámara perpendicular (PP) y la cámara paralela (PL) al rodillo de obturador de mano. La primera técnica detectó los escapes de aire a través de la diferencia de presión y la segunda detectó los locales con la temperatura más fría como puntos de fuga de aire. Los resultados mostraron que el análisis cuantitativo el escenario PP permitió una discusión más detallada. En el análisis cualitativo, la termografía activa, mostró más claramente los resultados.

Grinzato et al. (1998) utilizaron una metodología que resultó en una discusión de la detección y evaluación de las fallas en edificios. Para la detección de los escapes de aire, fue verificado en una pared maciza con defecto en el yeso, la termografía infrarroja cuantitativa, produjo imágenes antes y después de los escapes para la verificación. Se constató que un estímulo térmico, sea irradiación solar, flujo de aire o flujo radiante de una fuente artificial, sería útil en la detección de defectos. La principal desventaja del análisis transitorio es el aumento considerable del tiempo de procesamiento, difícilmente alcanzado sin equipamiento exclusivo.

3.2 Puentes térmicos

Los puentes térmicos son definidos como “todas y cualquiera zona de los alrededores de un edificio en las cuales la resistencia térmica es significativamente alterada relativamente a la zona corriente del entorno” (ISO, 2008 apud Castro, 2010). Las alteraciones ocurridas en la resistencia térmica pueden ser provocadas, por la total o parcial incorporación de materiales con diferente conductividad térmica, por la variación de su espesor y/o por la desigualdad de sus áreas interna o externa, como sucede en el caso de los enlaces entre paredes y pavimentos (Castro, 2010).

Asdrubali et al. (2012) traen en su trabajo, un análisis cuantitativo, a través de la utilización de la termografía infrarroja, como un experimento comparativo de un puente térmico aislada y otra no. El artículo propone una metodología para realizar un análisis cuantitativo de algunos tipos de puentes térmicos, a través de levantamientos termográficos simples y posterior procesamiento analítico. El puente térmico seleccionado fue dado a través de la diferencia de la estructura y del vidrio de la ventana colocada. Esta pared fue elaborada entre 2 salas, con diferencia de temperatura de 20°C. Fueron considerados 2 análisis. La diferencia entre el factor de incidencia de puentes térmicos con relación a las comparaciones es igual a 1606 para el aislado y 2000 para el no aislado. El factor de influencia calculado in situ, es igual a 2,111 y el factor de incidencia de los puentes térmicos calculado por el programa FLUENT es igual a 1,262. Por lo tanto, hay una reducción en la pérdida de calor del puente térmico cercano al 40%. Para un mejor desempeño fueron realizadas simulaciones para una pérdida de calor global en el invierno y se encontró pérdida de calor de 4684 W, 13,4% de los cuales debido al puente térmico. La corrección de este puente térmico reduciría la pérdida de calor para un valor de 4307 W y la incidencia del puente térmico para 8,8%.

Bianchi et al. (2014) utilizaron un análisis cuantitativo de la termografía infrarroja en la medición en campo con el objetivo de evaluar las pérdidas de energía a través de una edificación de 10m² en el cual fueron evaluadas las paredes externas, el techo y el piso. Para esto, fue realizado un comparativo entre 9 factores incidentes de puentes térmicos calculados e identificados. En general, el análisis trae que los puentes térmicos aumentan la pérdida de calor a través de la edificación en 9%. Los principales resultados muestran que el procedimiento es una herramienta confiable para cuantificar la incidencia de puentes térmicos. O’Grady et al. (2017a e 2017b), en sus dos trabajos, traen un enfoque cuantitativo y muestran la pérdida de calor por los puentes térmicos a través de la diferencia de temperatura y de la transmitancia térmica. Grinzato et al. (1998) trajeron en su investigación experimentos en tres diferentes tipos de paredes: concreto, lana de roca y panel adosado de concreto con una barra cruzando la capa de aislamiento. La finalidad fue la verificación del comportamiento del puente térmico en la utilización de la termografía infrarroja cuantitativa. Vea la tabla 1 para más información.

Cuadro 1. Resumen de los estudios sobre puentes térmicos

Autor	Metodología	Principales Conclusiones
Asdrubali, Baldinelli, Bianchi (2012)	Comparación de los resultados de la termografía infrarroja cuantitativa con datos obtenidos por medidores de flujo de calor y los resultados de un análisis de volumen finito.	El factor de incidencia del puente térmico describe correctamente el grado de dispersión de la singularidad, cuantificando el resultado de la térmica corrección del puente.
Bianchi et al. (2014)	Utilización de la termografía infrarroja cuantitativa en el monitoreo del área a ser estudiada.	Aumento de las pérdidas de calor de aproximadamente 9%
O'Grady, Lechowska, Harte (2017a)	Utilización de la termografía infrarroja cuantitativa sobre el estudio de los puentes térmicos a través de la diferencia de temperatura y transmitancia térmica; metodología experimental propuesta por el autor.	El viento impacta en la pérdida de calor por el puente térmico en la parte plana. Para puentes térmicos con velocidades de viento entre 0,5 m/s y 4 m/s, el desvío relativo varía entre + 5% y -9%.
O'Grady Lechowska, Harte (2017b)	Utilización de la termografía infrarroja cuantitativa sobre el estudio de los puentes térmicos a través de la diferencia de temperatura y transmitancia térmica; metodología experimental propuesta por el autor.	Funciona bien en el laboratorio. Después de probada en condiciones reales, la metodología puede ser aplicada en cualquier puente térmico.

3.3 Propiedades térmicas

Jorge (2011) muestra que las paredes son elementos construidos visando separar los ambientes y cuando la energía térmica es considerada, se puede observar y cuantificar a través de las propiedades térmicas. Como todo objeto, las paredes tienen propiedades mecánicas, químicas y térmicas. En las propiedades térmicas, se destacan la transmitancia térmica, difusividad térmica, resistencia térmica, capacidad térmica, coeficiente de transferencia de calor y la conductividad.

Aversa et al. (2017) propone el estudio experimental del comportamiento térmico de paredes opacas utilizando termografía activa estimulada con el objetivo de evaluar la eficacia de este método en un comportamiento dinámico en paredes prototipos y verificación de su éxito para aplicación *in situ*. Este compara una pared de ladrillos con un prototipo de pared con fibras de cáñamo. Se notó claramente que las fibras de cáñamo influyeron en un aumento del factor de decrecimiento (razón entre la transmitancia térmica periódica y la transmitancia térmica) de 0,87 para 0,92 para las paredes con las fibras. También en el aumento de la diferencia de tiempo estimado. Se concluye que diferentes resultados fueron encontrados, siendo el próximo paso a la medición *in situ*.

Grinzato et al. (2002) utilizaron termografía infrarroja y calcularon la difusividad térmica de una muestra de ladrillo de una edificación antigua en bloque macizo, localizado en el Arsenal Histórico de Venecia, realizando seis pruebas para auxiliar en el mapa de humedad. Fue realizado primeramente el análisis cuantitativo con monitoreo continuo seguido de un análisis cualitativo para mapear la distribución de humedad debido al efecto de enfriamiento de agua por evaporación. El mayor valor encontrado de difusividad térmica fue de $5,2800 \cdot 10^{-7} m^2/s$ y el menor fue de $5,1288 \cdot 10^{-7} m^2/s$. Los resultados mostraron que la aplicación para el mapa de humedad, en la unión de las paredes y en el conocimiento de la difusividad térmica de ladrillos y yeso fue un éxito.

Robinson et al. (2017) tiene por finalidad estudiar un método simple y de bajo costo para estimar la difusividad térmica efectiva en paredes estructurales de edificaciones. Para esto, utilizaron la termografía infrarroja como método experimental y de bajo costo para el cálculo de la difusividad térmica de la pared de concreto bajo condiciones controladas. La mayor dificultad encontrada en

este trabajo fue el control de la pérdida de calor por los límites laterales de la sección, siendo calculado in situ, visto que, en ambiente controlado, los límites laterales fueron aislados. Este experimento barato es combinado con un modelo matemático y resultó en una difusividad del concreto de $7,2 \text{ m}^2/\text{s} \pm 0,27 \text{ m}^2/\text{s}$, que es suficientemente preciso. Para este experimento los límites laterales fueron aislados, y se concluyó que hay una gran pérdida de calor para esos límites.

Danielsky y Fröling (2015) investigaron una metodología cuantitativa para analizar el desempeño térmico de la fachada de una edificación en condición de estado no estacionario, incluyendo dos fases. Hicieron experimentos con paredes de madera expuesta a condiciones externas para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, encontrándose el valor de $2,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Los parámetros externos utilizados fueron, velocidad del viento, humedad, caída de nieve, además del flujo de calor a través de la pared fue asumido para obtener condición de estado estable apenas escasamente y durante períodos cortos, si en todo. Fue utilizado el HFM y la termografía infrarroja para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor y de la conductividad. Los resultados se encontraron compatibles con diferencias entre los métodos de 4% y 3%, respectivamente para la conductividad y el coeficiente de transferencia global, sugiriendo que el método de la termografía es más preciso.

Donatelli et al. (2016) utilizaron termografía activa para dos paredes prototipos en condiciones ambientales controladas y calcularon la transmitancia térmica in situ, comparando con la transmitancia térmica calculada por un programa de computador. Los resultados mostraron que las mediciones de temperatura hechas en el software (FEA) son idénticas a las de una pared real y que el procedimiento permite la medición de la temperatura en pared prototipo a lo largo del año, sin interferencia climática.

O'Grady et al. (2017a) tuvieron la intención de elaborar un estudio con un método eficiente, no destructivo, basado en un levantamiento termográfico infrarrojo al aire libre, para determinar el desempeño del puente térmico. Para esto, compararon los valores de las propiedades térmicas, principalmente de transmitancia térmica, obtenidos por la termografía infrarroja cuantitativa, con los valores de una caja caliente y por un programa de computador para ajuste de los resultados. Fue calculada la transmitancia térmica de estos dos 2 métodos con 3 velocidades de vientos diferentes y hecha la comparación entre ellos. Para el cálculo de la transmitancia térmica, el coeficiente convectivo externo fue determinado usando la aproximación de Jürges y el número de Nusselt. Los resultados de este estudio demostraron la adecuación de ambos enfoques para el cálculo del valor de la transmitancia térmica, en cuanto a la aproximación de Jürges es menos demorado. La termografía infrarroja es una herramienta efectiva para la determinación de la transmitancia térmica.

O'Grady et al. (2017b) proponen la utilización de un método no invasivo y fácil de usar para brindar las mediciones cuantitativas del desempeño térmico real del puente térmico. Estudiaron las propiedades térmicas y utilizaron la termografía infrarroja cuantitativa además de un programa experimental hecho para cuantificar los puentes térmicos y probado en una caja caliente calibrada y controlada. Ellos utilizaron el cálculo de la transmitancia térmica y de la variación de temperatura. Fueron realizadas 3 muestras, y el mayor valor encontrado por la medición fue tanto por la hot box, cuanto por la termografía. La muestra 1 respectivamente, $0,441 \text{ W}/(\text{mK})$ y $0,436 \text{ W}/(\text{mK})$. Se puede concluir que después de probada en laboratorio y con excelentes resultados para las condiciones externas, las observaciones serán un desafío para la precisión de las mediciones por la termografía infrarroja.

3.4 Medición de temperatura

Datcu et al. (2005) utilizaron la termografía infrarroja cuantitativa para la medición de pared con el objetivo de mejorar la medición de la temperatura ambiente, tanto interna cuanto externa. Los autores utilizaron un espejo infrarrojo, que permite mayores medidas de temperatura superficial por termografía infrarroja bajo condiciones próximas al ambiente con mayor precisión. Para validar el método, un estudio experimental fue realizado en una pared de multicapas, que simuló un patrón

de aislamiento. La metodología abordada en el trabajo permitió cuantificar la radiación promedio alrededor del objeto usando en espejo de aluminio altamente reflexivo y difusivo. Entonces fueron utilizadas dos fuentes de calor, una con 24 y otra con 48 W/m^2 y los resultados encontrados fueron comparados con los resultados del programa FLUENT para el ambiente interno, y el ambiente externo, fueron comparados a temperatura de la pared, con la de la ventana y con el del receptor de calor.

Lai et al. (2015) utilizaron termografía infrarroja pasiva cuantitativa para el análisis de la pared externa de un rascacielos. Fueron utilizados cuatro paredes de concreto con diferentes revestimientos. La metodología fue utilizada cuando hubo cambios de flujo de calor y de intensidad solar. Ellos utilizaron cámaras termográficas y un programa computacional para el análisis. Porras-Amores et al. (2013) utilizaron la medición de la pared y la superficie a fin de localizar la temperatura de aire interior de la edificación. El estudio realizado se enfoca en el diseño del sistema, su caracterización y cuantificación de su precisión en diferentes configuraciones. Ellos desarrollaron el trabajo de termografía cuantitativa que pretende desarrollar una técnica precisa de medición. Fue realizado el experimento en el estacionamiento y en el sótano. Se apreciaron pequeñas variaciones de temperatura, longitudinalmente.

4. CONCLUSIÓN

La termografía infrarroja, como lo mostrado, puede ser utilizada combinada con otros métodos para efecto de comparación de valores y estructuras.

Se observó una gran aplicabilidad que la termografía infrarroja trae en la identificación de los puntos de escapes de aire. La utilización de la termografía activa ó pasiva va a generar diferentes resultados y la técnica activa muestra más claramente los escapes de aire. Las ventajas destacadas en la utilización de la termografía infrarroja para la detección de los escapes de aire es que los estímulos externos ayudan en esta detección. Las incertezas identificadas fueron las dificultades en el mayor tiempo de procesamiento del análisis transigente, que necesita de un equipo exclusivo para ello, y la interpretación de los datos de los gráficos e histogramas de presión versus temperatura. Para investigaciones futuras, la comparación entre las imágenes térmicas de la termografía infrarroja pasiva con la activa es un enfoque cuantitativo que sería de gran utilidad.

Las ventajas encontradas en los puentes térmicos son evaluaciones de forma simples y eficaz del efecto del puente térmico en la construcción del comportamiento de la energía térmica. Simplicidad de la geometría de la edificación facilita para valores medidos y calculados. En particular, la incerteza del consumo de energía en la configuración con puentes térmicos debe ser tomado en cuenta el error singular debido al análisis de cada puente térmico. El factor de incidencia del puente térmico, analíticamente definido, depende de la temperatura interna de aire y de la temperatura interna de la pared para que la cámara termográfica infrarroja pueda leer. Las aplicaciones sobre puentes térmicos identificadas a través de las mediciones es posible hacer las intervenciones para la mejoría de los aislamientos. Además de esto, es un medio útil para analizar, perfeccionar y validar las herramientas de simulación 3D especialmente proyectadas para la evaluación del desempeño energético en edificios, una vez que estas son capaces de evaluar campos térmicos de paredes internas y externas.

Con relación a las propiedades térmicas, lo que más se abordó fue el cálculo de la transmitancia térmica, habiendo varios métodos para calcular y comparar los resultados, existiendo diferencias significativas entre la transmitancia térmica calculada y la medida *in situ*. Además, algunos trabajos enfatizaron que la medición *in situ* de las propiedades térmicas sería mejor ejecutada en invierno. Hay un estudio hecho en laboratorio, indicando que el procedimiento implementado busca la medición en paredes prototipos durante todo el año, sin preocupaciones con cambios climáticos. Las ventajas encontradas de la termografía infrarroja son la multidisciplinariedad y la integración de los resultados. Entre la incerteza que se repitió, en algunos trabajos fue, como la metodología

aplicada se comportaría lo cual sería su resultado en condiciones normales, es decir, sin ser controladas en laboratorio. Las dificultades encontradas fueron bastante puntuales, tanto en relación con la utilización de la termografía infrarroja en edificios históricos debido a diversos factores ambientales, como a las pérdidas de calor no controladas por los límites laterales de la sección bajo observación. Y no hubo restricciones en cuanto a la aplicabilidad para este tópico.

También fue muy utilizado el enfoque de la termografía infrarroja para la medición de temperatura, la cual presentó un alto poder comparativo. La termografía infrarroja tiene la ventaja de mostrar imágenes con diferentes identificaciones, para medir la temperatura de la superficie en un área del elemento en construcción, ofreciendo así, datos más representativos en relación con las mediciones puntuales. Las dificultades encontradas fueron en el monitoreo cuantitativo a través de la termografía convencional que presenta problemas en la medición de la temperatura de superficie y condiciones de aire en el interior de la edificación. Además de esto, puede ser hecha su aplicación en diversas superficies.

De manera general, la mayor parte de los trabajos sobre la termografía infrarroja trajo el análisis cuantitativo. El enfoque activa también es bastante explorado. Se apreció que hay una multidisciplinariedad entre los tópicos abordados, visto que algunos autores, en sus trabajos, utilizaron la termografía infrarroja para hablar sobre más de un aspecto, enriqueciendo y complementando el estudio hecho.

Algunos autores utilizaron programas computacionales, principalmente para la medición de las propiedades térmicas, cuando había estudios experimentales facilitando la comparación entre valores experimentales y teóricos. Los trabajos que utilizaron experimentos con prototipos y condiciones controladas y tuvieron éxito, dejaron una importante consideración referido a que el próximo paso sería la medición in situ. Por tanto, se espera que la termografía infrarroja sea cada vez más explorada y pueda traer mejores desempeños y economía energética en las edificaciones.

5. REFERENCIAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2013a). “*NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1 – 6*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2013b). “*NBR 15572: Ensaio não destrutivo – Termografia Infravermelha – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2005). “*NBR 15220: Desempenho térmico das edificações Parte 1 – 5*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2010). “*NBR 15866: Ensaio não destrutivo – Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2009). “*NBR 15763: Ensaio não destrutivo – Termografia – Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência*”. Rio de Janeiro.

Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A. M., Gialanella, S. (2013), “*Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer*”, Energy and buildings, V.66, p.33-40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.004>

Albatici, R., Tonelli, A. M. (2010), “*Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*”, Energy and Buildings, V.42, No.11, p.2177-2183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>

Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, G. (2012), “*A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*”, Applied Energy, V.97, p.365-373. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054>

ASTM. (2013a). “*C1046-95: Standard practice for in-situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components*”, (West Conshohocken, United States: ASTM

- International), p. 10. <http://dx.doi.org/10.1520/C1046>
- ASTM. (2013b). “*C1155-95: Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 8. <http://dx.doi.org/10.1520/C1155-95R13>
- ASTM. (2015a). “*C1060-11a: Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 7. <http://dx.doi.org/10.1520/C1060-11AR15>
- ASTM. (2015b). “*C1153-10: Standard practice for location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 6. <http://dx.doi.org/10.1520/C1153-10R15>
- Aversa, P., Palumbo, D., Donatelli, A., Tamborrino, R., Ancona, F., Galietti, U., Luprano, V. A. M. (2017), “*Infrared thermography for the investigation of dynamic thermal behaviour of opaque building elements: Comparison between empty and filled with hemp fibres prototype walls*”, *Energy and Buildings*, V.152, p.264-272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.055>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T. (2013), “*Infrared thermography for condition monitoring – A review*”, *Infrared Physics & Technology*, V.60, p.35-55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Barr, E. S. (1961), “*The infrared pioneers—I. Sir William Herschel*”. *Infrared Physics*, v. 1, p. 1-2.
- Bianchi, F., Pisello A. L., Baldinelli G., Asdrubali, F. (2014), “*Infrared Thermography Assessment of Thermal Bridges in Building Envelope: Experimental Validation in a Test Room Setup*”, *Sustainability*, V. 10, No. 6, p.7107-7120. <https://doi.org/10.3390/su6107107>
- Brás, A., Gonçalves, F., Faustino, P. (2014), “*Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation*”, *Energy and Buildings*, V.72, p.296–308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.022>
- Cani, B. F., Marinoski, D. L., Lamberts, R. (2012), “*Aplicação da termografia infravermelha para verificação da temperatura em telhas cerâmicas com diferentes teores de umidade e condições de limpeza da superfície*” in: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - XIV ENTAC, Juíz de Fora: MG (BR).
- Castro, J. L. B. B. (2010), “*Quantificação dos coeficientes de transmissão térmica lineares - pontes térmicas*”, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, p.314.
- Ciocia, C., Marinetti, S. (2012). “*In-situ emissivity measurement of construction materials*”, in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Napoly: Italy.
- Clark, M., McCann, D., Forde, M. (2003), “*Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges*”. *NDT&E International*, V.36, No. 4, pp. 265- 275.
- Danielski, I., Fröling, M. (2015). “*Diagnosis of buildings’ thermal performance - a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow*”, *Energy Procedia*, V.83, p.320-329. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.186>
- Datcu, S., Ibos, L., Candau, Y., Mattei, S. (2005), “*Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*”, *Infrared Physics & Technology*, V. 46, p. 451-467. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.01.001>
- Decreto-Lei Nº 80/2006. (4 de Abril de 2006). Regulamento das características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- Diao, R., Sun, L., Yang, F. (2018), “*Thermal performance of building wall materials in villages and towns in hot summer and cold winter zone in China*”, *Applied Thermal Engineering*, V. 128, p. 517-530. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.159>
- Directive 2010/31/EU Of The European Parliament and of the Council. (2010). Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=IT>>
- Acessado em: 13 de Junho de 2018.

- Donatelli, A., Aversa, P., Luprano, V. A. M. (2016), “*Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls*”, *Infrared Physics & Technology*, V. 79, p. 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.10.005>
- EIA. U.S. Energy information administration. (2018). Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1>. Acessado em: 15 de Junho de 2018.
- EN. (1999), “13187: Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method”, (London, United Kingdom: British Standards Institution), p. 16. <https://doi.org/10.3403/01569434U>
- FLIR-Forward Looking Infrared. (2017). “*User’s manual FLIR Cx Series*” (Wilsonville, United States: FLIR), p. 67.
- Ghahramani, A., Castro, G., Karvigh, S. A., Becerik-Gerber, B. (2018), “*Towards unsupervised learning of thermal comfort using infrared thermography*”, *Applied Energy*, V. 211, p. 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.021>
- Green Building Council Brasil. (2015), “*O consumo de energia nas edificações do Brasil*”. Disponível em: <http://www.gbcbrazil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=119>. Acesso em: 03 de julho de 2018.
- Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S. (2002). “*Monitoring of ancient buildings by the thermal method*”, *Journal of Cultural Heritage*, V.3, p. 21–29. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01159-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01159-7)
- Grinzato, E., Vavilov, V., Kauppinen, T. (1998). “*Quantitative infrared thermography in buildings*”, *Energy and Buildings*, V.29, No.1, p. 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)
- ISO (2015), “*6781-3: Performance of buildings -- Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods -- Part 3: Qualifications of equipment operators, data analysts and report writers*”, (Geneva, Suíça: [International Organization for Standardization](http://www.iso.org)), p. 18.
- ISO (2008), “*13790: Energy performance of buildings -- Calculation of energy use for space heating and cooling*”, (Geneva, Suíça: [International Organization for Standardization](http://www.iso.org)), p. 167.
- Jorge, L. F. A. (2011). “*Determinação do coeficiente de transmissão térmica em paredes de edifícios*”, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Portugal, p. 112.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., Kalogirou, S. A. (2014). “*Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*”, *Applied Energy*, V.134, p.531-549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- Lai, W. W., Lee, K., Poon, C. (2015). “*Validation of size estimation of debonds in external wall’s composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm*”, *Construction and Building Materials*, V. 87, p. 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.032>
- Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R. M. S. F. (2018). “*A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration*”, *Energy and Buildings*, V. 168, p. 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.050>
- Lucchi, E. (2018). “*Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 82, parte 3, p. 3077-3090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
- Maldague, X. (2001). “*Infrared and Thermal testing: Nondestructive testing handbook*. 3th ed, Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.
- Marino, B. M., Muñoz, N., Thomas, L. P. (2016). “*Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography*”, *Applied Thermal Engineering*, V. 114, p. 1213-1221. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033>
- Marinoski, D. L., Souza, G. T., Sangoi, J. M., Lamberts, R. (2010). “*Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos*”, in: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Canela: Rio Grande do Sul (BR).
- Marques, T. H.T., Chavatal, K. M. S. (2013). “*A Review of the Brazilian NBR 15575*

standard: applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance”, in: Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, San Diego: Califórnia (EUA).

Meola, C. (2012), *Infrared thermography: recent advances and future trends*. Bentham Books, Italy, p.24-26. eISBN: 978-1-60805-143-4.

Milovanović, B., Pečur, I. B., Štirmer, N. (2016). “*The methodology for defect quantification in concrete using ir thermography*”, *Journal of civil engineering and management*, V. 23, p. 573-582. <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1210220>

O’Grady, M, Lechowska, A. A., Harte, A. M. (2017b). “*Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging*”, *Energy and building*, V.135, p. 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>

O’Grady, M., Lechowska, A.A., Harte, A. M. (2017a). “*Quantification of heat losses through building envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography Technique*”, *Applied Energy*, V.208, p. 1038-1052. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.047>

Pei, C., Qiu, J., Liu, H., Chen, Z. (2016). “*Simulation of surface cracks measurement in first walls by laser spot array thermography*”, *Fusion Engineering and Desing*, V.109-111, parte B, p. 1237-1241. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.11.055>

Porras-Amores, C, Mazzarrónb, F.R., Canas, I. (2013), “*Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature*”, *Energy and Building*, V.65, p.292-298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.022>

Rajic, N. (2002), “*Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*”, *Composite Structures*, V. 58, p. 521-528. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00161-7)

Robinson, A. J., Lesage, A. F. J., Reilly, A., Mcgranaghan, G., Byrne, G., O’hegarty, R., Kinnane, O. (2017), “*A New Transient Method for Determining Thermal Properties of Wall Sections*”, *Energy and Buildings*, V. 142, p. 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.029>

Rocha, J. H. A., Póvoas, Y. V. (2017). “*A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte*”, *Revista ALCONPAT*, V. 7, nº 3. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>

Savastano Junior, H., Pimentel, L. L. (2000). “*Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção*”, [Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi](http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000100019), V. 4, n. 1, p. 103-110. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000100019>

Silva, E. P., Cahino, J. E. M., Melo, A. B. (2012), “*Avaliação do desempenho térmico de blocos EVA*”, in: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juíz de Fora: Minas Gerais (BR).

Simões, I., Simões, N, Tadeu, A., Riachos, J. (2014), “*Laboratory assessment of thermal transmittance of homogeneous building elements using infrared thermography*”, in: 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Bordeaux: France.

Smith, R. A., Jones, F. E., Chasmar, R. P. (1958), *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*, Oxford University Press.

Tanic, M., Stankovic, D., Nikolic, V., Nikolic, M., Kostic, D., Milojkovic, A., Spasic, S., Vatin, N. (2015). “*Reducing Energy Consumption by Optimizing Thermal Losses and Measures of Energy Recovery in Preschools*”, *Procedia Engineering*, v. 117, p. 919 – 932. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.179>

Viéguas, D. J. A. (2015). “*Utilização de termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimentos*”, *Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco*, Recife, p. 164.

Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) - Una revisión

P. J. Poot Cauich¹ , R. Martínez-Molina¹ , J. L. Gamboa Marrufo¹ , P. J. Herrera Franco^{1*} 

*Autor de Contacto: pherrera@cicy.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

Recepción: 30/03/2019 | Aceptación: 22/04/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Paulo Helene

RESUMEN

Este documento aborda la mecánica de la adhesión, el efecto de reforzamiento y la durabilidad de las aplicaciones de materiales compuestos de CFRP en vigas. La aplicación de los materiales de CFRP se ha descrito ampliamente, pero el enfoque principal se ha centrado en los parámetros generales de falla. El primer problema es el fortalecimiento de la capacidad del refuerzo de CFRP para vigas de concreto. El segundo es la relación local tensión-deslizamiento del enlace de la interfaz, es decir, el deslizamiento τ local. El último problema es la durabilidad de la hoja/placa de CFRP, cuando se expone a un ambiente hidro-térmico. El papel de la adhesión y la mecánica de la adhesión de concreto-CFRP y una buena comprensión de la interfaz entre el CFRP y el comportamiento del concreto es el factor clave para controlar las fallas de desunión en vigas de CR reforzadas con CFRP.

Palabras clave: materiales compuestos de fibras de carbón; interfase resina-concreto; interfase fibra-matriz; reacondicionamiento; adhesión.

Citar como: Poot Cauich, P. J., Martínez-Molina, R., Gamboa Marrufo, J. L., Herrera Franco, P. J. (2019), "Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) - Una revisión", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 130 – 150, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

¹ Universidad Marista, Mérida, Yucatán, México.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review

ABSTRACT

This paper addresses the mechanics of adhesion, strengthening effect and durability issues of applications of CFRP composite materials in beams. The application of CFRP materials has been widely described, but the main focus has been on overall failure parameters. The first issue is strengthening capability of CFRP reinforcement for concrete beams. The second is the local interface bond stress-slip relationship, that is, the local τ -slip. The last issue is the durability of the CFRP sheet/plate, when exposed to a hydro-thermal environment. The role of adhesion and the mechanics of concrete-CFRP adhesion and a sound understanding of the interface between the CFRP and concrete behavior is the key factor for controlling debonding failures in CFRP-strengthened RC beams.

Keywords: carbon fiber composites; resin-concrete interphase; fiber-matrix interphase; retrofitting; adhesion.

Adesão, fortalecimento e problemas de durabilidade na restauração de varredura Concreto Reforçado (CR) usando o Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão

RESUMO

Este artigo aborda a mecânica de aderência, o efeito de fortalecimento e a durabilidade de aplicações compostas de composto de CFRP em vigas. A aplicação de materiais CFRP foi descrita extensivamente, mas o foco principal tem sido nos parâmetros gerais de falha. O primeiro problema é fortalecer a capacidade de reforço do CFRP para vigas de concreto. O segundo é o relacionamento local tensão-escorregamento do link de interface, isto é, o escorregamento local deslizamento local τ . O último problema é a durabilidade da chapa / chapa CFRP, quando exposta a um ambiente hidrotermal. O papel da adesão e a mecânica da aderência do concreto CFRP e uma boa compreensão da interface entre o CFRP e o comportamento do concreto é o fator chave no controle de falhas de desunião em feixes CR reforçados com CFRP.

Palavras-chave: compósitos de fibra de carbono; interface resina-concreto; interface de matriz de fibra; reequipamento, adesão.

NOMENCLATURE

a – longitude de cortante	β_1 – Coeficiente que determina la aproximación de la curva de compresión resultante del concreto a un rectángulo de acuerdo con las recomendaciones de ACI 440-2R (2008)
b_f – ancho de capa de PRFC	ϵ_{bi} – Deformación encontrada en el recubrimiento del refuerzo de tensión en la viga antes del refuerzo.
b_w – ancho de la viga	ϵ_c – Deformación del concreto
b_p – ancho de la placa de PRFC adherida	ϵ_{cu} – Deformación última del concreto
b_c – ancho de concreto en experimento de extensión	ϵ_f – Deformación de la fibra de carbono
L_b – Longitud de PRFC adherida	
L_e – Longitud efectiva de PRFC	
T_p – Espesor de la placa de PRFC adherida	
c – Altura del bloque de compresión rectangular equivalente del concreto.	

c_1 – Factor obtenido por calibración de resultados (igual a 0.64 para PRFC)
 d – Altura efectiva de la viga
 d' – Posición del centroide del refuerzo comprimido.
 f_c – Resistencia a la compresión del concreto
 f_{ctm} – Resistencia media a la tensión del concreto.
 f_{fe} – Fuerza efectiva del PRFC
 f_s – Fuerza del acero
 A_f – Área de refuerzo aplicada al
 A_s – Área de acero del refuerzo de tensión.
 A_s' – Área de acero de refuerzo comprimido.
 E_f – Módulo de elasticidad del PRFC
 E_s – Módulo de elasticidad del acero
 F_{cc} – Compresión resultante
 L – Longitud total de la viga
 P – Carga aplicada en la prueba experimental
 T_s – Componente de tensión debido al refuerzo de tensión.
 α – Coeficiente de reducción debido a la propagación de grietas inclinadas.

ε_{fd} – Valor límite de la de deformación de la fibra que se adoptará en el dimensionamiento y verificación del refuerzo.
 ε_{fe} – Deformación efectiva en el FRP
 ε_{fu} – Deformación máxima observada en el polímero en el momento del fallo.
 ε_s – Deformación en el refuerzo a tensión.
 ε_s' – Deformación en el refuerzo comprimido.
 ε_{ys} – Deformación de rendimiento del refuerzo flexural.
 G_f – Energía de fractura interfacial
 s – Deslizamiento local;
 s_e – Componente elástico del deslizamiento local.;
 s_f – Deslizamiento local cuando el esfuerzo de la adherencia τ se reduce a cero
 s_0 – Deslizamiento local a τ_{max} ;
 B_l – factor de longitud de enlace;
 B_w – factor de relación de ancho;
 τ – Esfuerzo de adherencia local;
 τ_{max} – Esfuerzo máximo de la adhesión local;
 τ_u – Esfuerzo de adhesión promedio.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas cuatro décadas, el desarrollo de materiales desde el punto de vista teórico y tecnológico de los materiales compuestos avanzados ha resultado en un uso más amplio de los mismos. Sus propiedades de ingeniería sobresalientes, como alta resistencia y rigidez específicas, menor densidad, alta resistencia a la fatiga, alto amortiguamiento y bajo coeficiente térmico (en la dirección de la fibra), etc., han resultado en un uso constante en las industrias aeroespacial, marina y automotriz.

Las estructuras de concreto reforzado pueden dañarse después de algunos años de servicio o exposición a ambientes agresivos, como los marinos y/o industriales, y por lo tanto necesitan reparación. Luego, para permitir una capacidad de carga más alta que el valor de diseño original, los miembros estructurales deben ser adaptados. La corrosión es una de las principales causas del deterioro de la infraestructura civil, especialmente de los puentes de acero, con consecuencias que van desde el debilitamiento progresivo de los elementos estructurales debido al agrietamiento y la pérdida de la sección transversal, hasta el colapso repentino. Los altos índices de resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales compuestos los hacen atractivos para su uso en rehabilitación de infraestructura. Una técnica de reparación / remodelación común para vigas de concreto, es unir una placa al sofito de la viga. Inicialmente, se emplearon planchas de acero y, más recientemente, se ha prestado atención al uso de planchas de plástico reforzado con fibra de carbono (PRFC), que ofrecen mayor resistencia / peso, y varios atributos atractivos mencionados anteriormente y una mayor durabilidad sobre sus contrapartes de acero. Además, estos materiales compuestos avanzados se están considerando como un reemplazo del acero convencional en estructuras de concreto reforzado debido a una disminución continua del costo de los materiales de PRFC y al

desarrollo de adhesivos sintéticos basados en resinas epoxi, (CKY Leung, (2001), Swamy RN et al, (1987), Hamoush SA (1990), Norris, (1997), Karbhari, et al, (1995), Saadatmanesh, (1995)). Se ha estudiado el rendimiento del PRFC como agente de refuerzo para elementos de concreto, a partir del método estructural, de materiales y de aplicación. El reforzamiento a la flexión de las vigas CR que utilizan materiales compuestos se puede proporcionar mediante la unión con epoxi de la placa PRFC a la porción de los elementos sometidos a esfuerzos de tensión, con fibras paralelas a la dirección del esfuerzo principal. Si las fibras de material compuesto se colocan perpendiculares a las grietas, se logra un gran aumento de resistencia y rigidez en comparación con la situación en la que las fibras se colocan oblicuas a las grietas. Además, la mejora de la refuerzo de vigas de CR de aproximadamente 200% se logra con materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC). El rendimiento de flexión de las vigas CR reforzadas se ve afectado por varios factores, como el módulo de elasticidad de PRFC y su ubicación del centro de gravedad con respecto al eje neutro, el ancho del laminado, la longitud del laminado, la cantidad de refuerzo principal y de cizallamiento, el número de capas de PRFC, nivel de carga, configuración de laminación, resistencia y cobertura del concreto, daños y condiciones de carga, etc. (Sandeep S. et al, 2008).

La adhesión del PRFC externo al sustrato de concreto es de importancia crítica para la eficacia del mecanismo de refuerzo, ya que significa la transferencia de esfuerzos entre el concreto y la PRFC con el fin de desarrollar una acción compuesta. Varios informes se pueden encontrar en la literatura técnica de diferentes estudios de aspectos que afectan a la eficiencia del refuerzo del PRFC.

El principal objetivo de este trabajo es revisar la literatura (analítica/experimental) de los diferentes parámetros que afectan a los mecanismos de transferencia de carga desde el elemento de CR al PRFC y para analizar los efectos de diversos parámetros que afectan a la durabilidad, sobre todo, parámetros relacionada con la interfaz adhesivo-concreto, así como el desempeño del laminado de material compuesto cuando se expone a ambientes higo-térmicos. La discusión se mantiene en un nivel descriptivo y se aconseja al lector que consulte las referencias citadas para los detalles de los parámetros y modelos matemáticos.

Chajes, M.J. et al, (1996) estudiaron parámetros tales como la resistencia en la resistencia media de la unión y la transferencia de fuerza de las placas de material compuesto al concreto. Observaron que dos mecanismos de falla rigen el corte del concreto debajo de la superficie del concreto y la falla de tipo cohesivo, dependiendo del tipo de adhesivo y concreto. También mostraron que la preparación de la superficie del concreto puede influir en la resistencia de la unión. Yoshizawa et al. (1996) realizaron estudios similares, que informaron que la rugosidad de la cara del concreto tenía un efecto en la capacidad de carga de la muestra. Además, cuando el modo de falla de la junta se regía por el corte del concreto, la resistencia final de la unión era proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia del concreto f_c . También encontraron que existe una longitud de unión efectiva para una junta más allá de la cual no se puede lograr un aumento adicional en la carga de falla.

2. LA MECÁNICA DE LA ADHESIÓN CONCRETO-PRFC

2.1 Análisis lineal de la junta de concreto-PRFC adherida.

La separación entre el concreto y las láminas/tiras de PRFC unidas externamente en los casos de refuerzo de flexión y corte reduce la eficiencia de refuerzo de los materiales de PRFC o causa una deficiencia en la ductilidad de los miembros (Dai, et al, 2005). Se ha demostrado que la resistencia de unión de la interfaz o la propiedad de esfuerzo-deslizamiento local influyen en la resistencia máxima a la flexión o al corte de los miembros de CR restituidos utilizando PRFC por medio de modelos analíticos (Buyukozturk y Hearing 1998, fib 2001) dando nacimiento a varios modelos de resistencias de unión, longitud de anclaje y de esfuerzo-deslizamiento local (Chen y Teng, 2001). Según lo declarado por Lu, et al (2005), un modelo preciso de deslizamiento de enlace es de fundamental importancia en el modelado de la estructura de CR reforzada con FRP. Una buena

comprensión del comportamiento de la interfaz entre el PRFC y el concreto es el factor clave que controla las fallas de desunión en las estructuras de CR reforzadas con PRFC. Por lo tanto, para el diseño seguro y económico de los sistemas PRFC adheridos externamente, en este documento hacemos referencia al análisis presentado por De Lorenzis, L. 2001, y mencionamos otros modelos disponibles en la literatura técnica (ver Figura 1), (Taljsten B. 1997, Bizindavyi L. 1999, Mander JB 1998, Jeffries, JM 2001).

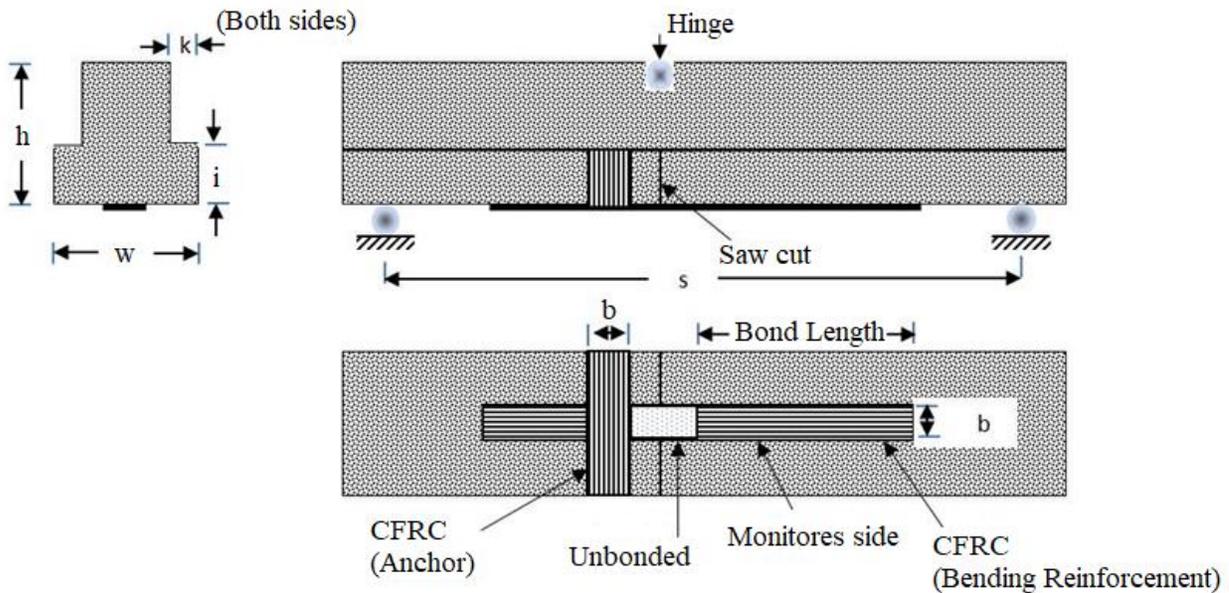


Figura 1. Especimen de prueba mostrando las dimensiones de la viga de concreto y la posición y las dimensiones del refuerzo de flexión de CFRC, así como el anclaje de PRFC. (Según De Lorenzis, L. 2001)

Considerando el equilibrio estático y las relaciones de compatibilidad de un elemento diferencial de hoja de longitud dx , y asumiendo un comportamiento elástico lineal de la hoja PRFC y que la rigidez del concreto es mucho mayor que la rigidez del compuesto, es decir, una deformación despreciable en el Concreto y que el adhesivo esté sujeto a fuerzas de corte solamente, se obtiene la siguiente ecuación diferencial. A niveles de carga moderados, se puede adoptar un comportamiento del esfuerzo de adherencia-deslizamiento local lineal:

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{1}{tE} \tau[s(x)] = 0 \quad (1)$$

Donde s es el deslizamiento, τ es esfuerzo de unión, x la coordenada a lo largo de la longitud unida del laminado, t el espesor y E el módulo elástico del PRFC. A niveles de carga moderados, se puede adoptar un comportamiento de deslizamiento de tensión de unión lineal. Una solución de la ecuación 1 es

$$s(x) = C_1 \text{Sinh } \alpha x + C_2 \text{Cosh } \alpha x \quad (2a)$$

$$\varepsilon(x) = \alpha C_1 \text{Cosh } \alpha x + \alpha C_2 \text{Sinh } \alpha x \quad (2b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (2c)$$

$$\text{Donde } \alpha = \sqrt{\frac{K}{tE}} \quad (3)$$

Las constantes C_1 y C_2 se pueden determinar a partir de las condiciones de frontera. Si el origen de la coordenada x corresponde al extremo libre de la hoja ($x = 0$), donde no existe deformación, y $x = l$ (siendo l la longitud unida) corresponde al final de la hoja PRFC donde está la carga externa aplicadas directamente, las condiciones de frontera son:

$$\varepsilon(0) = 0 \quad (4a)$$

$$\varepsilon(l) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (4b)$$

Y las ecuaciones 2a-c quedan como

$$s(x) = \left(\frac{\sigma_0}{\alpha E} \right) \frac{\text{Cosh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5a)$$

$$\varepsilon(x) = \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \frac{\text{Sinh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (5c)$$

El módulo de deslizamiento K puede estimarse utilizando un modelo de corte simple como la relación del módulo de corte del adhesivo y el espesor de la capa adhesiva. Además, cuando se utiliza PRFC basado en hojas en lugar de placas, el módulo de deslizamiento $K = G_{int}/t_{int}$ es decir, la relación del módulo de corte de FRPC, G_{int} y el grosor de la interfaz t_{int} donde G_{int} es el módulo de corte de la interfaz de lámina de concreto FRPC. y t_{int} es el grosor de la interfaz, se puede evaluar de la siguiente manera: cuando el material compuesto se forma in situ, utilizando la técnica de colocación en húmedo, el sistema de resina sirve intrínsecamente como matriz para el compuesto y la capa intermedia entre el concreto y el compuesto, es decir, como la capa adhesiva. Esta capa es el medio principal para la transferencia de esfuerzos cortantes entre el material compuesto y el concreto. Para la estimación de G_{int} , la capa de imprimación también debe ser considerada. Por lo tanto, G_{int} , y t_{int} se pueden calcular a partir de los espesores obtenidos de microscopía electrónica de barrido y de las propiedades elásticas de la resina y del primer, la regla de la mezcla para el módulo de corte:

$$G_{int} = \frac{G_{resin} G_{primer}}{t_{resin} G_{primer} + t_{primer} G_{resin}} \quad (6)$$

Donde:

$$G_{resin} = \frac{E_{resin}}{2(1+\nu_{resin})} \quad (7)$$

La ecuación 7 también se puede usar para estimar el módulo de corte del acoplador. Las curvas de deslizamiento τ -locales se pueden obtener a partir de datos experimentales de la siguiente manera. El esfuerzo de adherencia, τ , se puede encontrar por el equilibrio de fuerzas, considerando también la elasticidad lineal del FRPC.

$$\tau(x) = tE \frac{d\varepsilon_r(x)}{dx} \quad (8)$$

Donde ε_r es la deformación del PRFC hasta el fallo, por lo tanto, el diagrama $\tau(x)$ se puede obtener a partir de la primera derivada del diagrama de deformación contra posición multiplicado por el módulo de elasticidad E y el espesor.

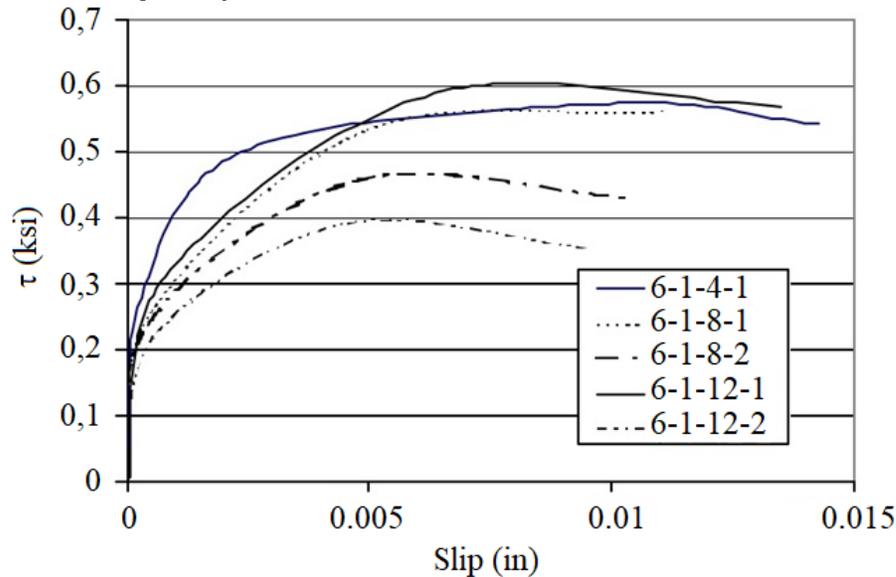


Figura 2. Relaciones locales de τ -deslizamiento para muestras con diferentes longitudes de unión PRFC (4, 8 y 12 in) unidas en el lado de tensión de una viga de concreto. Nota: 1 in = 25.4 mm; 1 psi = 7,03 kPa (De Lorenzis et al (2001)).

La Figura 2 ilustra algunas curvas de esfuerzo de adherencia τ -deslizamiento obtenidas de muestras probadas a un nivel de carga correspondiente a un desprendimiento inminente. Esto se identificó como el nivel de carga en el que la distribución de la deformación se vuelve lineal. Las curvas de τ -deslizamiento típicas deben consistir en una rama ascendente con degradación continua de la rigidez a un esfuerzo de unión máxima y una rama descendente curvada que alcanza un esfuerzo de unión cero en un valor finito de deslizamiento. Mientras que un modelo preciso de adherencia-deslizamiento debe consistir en una rama ascendente curvada y una rama descendente curvada, otras formas, como un modelo bilineal, pueden usarse como una buena aproximación. Un modelo preciso de enlace-deslizamiento debe proporcionar predicciones cercanas tanto de la forma como de la energía de fractura (área bajo la curva de esfuerzo de adherencia-deslizamiento) de la curva de esfuerzo de adherencia-deslizamiento. Ninguno de los modelos existentes de adherencia-deslizamiento proporciona predicciones precisas tanto de la forma como de la energía de fractura interfacial como se encontró en las pruebas. El área debajo de la curva de τ -deslizamiento, indicada como G_f , es la energía de fractura por unidad de área de la unión de adherencia (Lu X.Z. 2005). En un artículo reciente, Hamze-Ziabari y Yasalovi, (2017), hicieron un resumen de las ecuaciones existentes para la predicción de la transferencia de carga entre el concreto y la longitud efectiva de transferencia de carga del PRFC. Estas ecuaciones se derivaron de consideraciones teóricas de la mecánica de fractura o de ecuaciones empíricas calibradas con conjuntos de datos experimentales

o combinaciones de las dos. Sin embargo, la precisión de estos modelos parecía ser limitada. En aras de la exhaustividad, algunas de estas ecuaciones también se reproducen en esta revisión (ver tabla 1):

Tabla 1. Ecuaciones para estimar la carga máxima transferible P_{max} , así como la longitud efectiva del FRPC.

Reference	Equation maximum transferable load P_{max}	Effective length and considerations
Chen, F.J., Teng, G.J. (2001)	$P_{max} = 0.315\beta_p\beta_L b_p L_e \sqrt{f_c}$	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}}$ $\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b}}{1 + \frac{b_p}{b}}}$ $\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{if } L_b \geq L_e \\ \text{Sin } \frac{\pi L_b}{2L_e} & \text{if } L_b \leq L_e \end{cases}$
De Lorenzis <i>et al</i> (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{2E_f t_p G_f}$	G_f es la energía de fractura por unidad de área de la unión, que se supone que es igual a 1.06 N-mm/mm ²
Teck-Yong <i>et al</i> (1987)	$P_{max} = \left(0.5 + 0.08\sqrt{\frac{E_f t_p}{1000}}\right) \frac{b L_e f_c}{2}$	
Van Gemert (1980)	$P_{max} = \frac{b_p L f_c}{2}$	
Tanaka (1996)	$P_{max} = (6.13 - \ln(L_b)) b_p L_b$	
Maeda <i>et al</i> (1997)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_f t_p b_p L_e$	$L_e = e^{6.15 - 0.58 \ln(E_f t_p)}$
Yuan, Wu and Yoshizawa, (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{\frac{2G_f}{\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c}}}$	
Neubauer and Rostasy (1997)	$P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \text{ if } L_b \geq L_e$ $P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e}\right) \text{ if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_e}}{1 + \frac{b_p}{400}}}$
Khalifa <i>et al</i> (1998)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_p t_p b_p L_e \left(\frac{f_c}{42}\right)^{2/3}$	$L_e = e^{6.13 - 0.58 \ln E_p t_p}$
Adhikary and Mutsuyoshi (2001)	$P_{max} = b_p L_b (0.25 f_c)$	
Dai <i>et al</i> (2006)	$P_{max} = (b_p + 7.4) \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$G_f = 0.514 f_c^{0.236}$

<p>Lu <i>et al</i> 2005</p>	$P_{\max} = b_p B_1 \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$L_e = a + \frac{1}{2\lambda_1} \operatorname{Ln} \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)} \right)$ $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{s_0 E_p t_p}} \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{(s_f - s_0) E_p t_p}}$ $a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left[0.99 \sqrt{\frac{s_f - s_0}{s_f}} \right]$ $\tau_{\max} = \alpha_1 B_w f_t \quad \alpha_1 = 0.15$ $G_f = 0.308 B_w^2 \sqrt{f_t}$ $s_0 = 0.0195 B_w f_t$ $B_w = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{b_p}{b}}{1.25 + \frac{b_p}{b}}}$ $B_1 = \sin \left[\frac{\pi L_b}{2L_e} \right]$
<p>Camli and Binici (2007)</p>	$P_{\max} = \sqrt{\tau_f \sigma_f} \sqrt{E_f t_p b_p} \tanh \left(\frac{\theta L_b}{L_e} \right)$	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}} \quad \theta = \sqrt{\frac{\tau_f}{\sigma_u f_c^{1/2}}}$ $\tau_f = 3.5 f_c^{0.19}$ $\sigma_u = f_c^\alpha \left(\frac{L_b}{L_e} \right)^\beta \left(\frac{b_b}{b} \right)^\gamma$ $\alpha = -0.4 \quad \beta = 0.8 \quad \gamma = 0.4$
<p>FIB model (2001)</p>	$P_{\max} = 0.64 k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \quad \text{if } L_b \geq L_e$ $P_{\max} = 0.64 \alpha k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \left(\frac{L_b}{L_e} \right) \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) \quad \text{if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{\frac{1.125 \left(2 - \frac{b_p}{b_e} \right)}{1 + \frac{b_p}{400}}}$ $\alpha = 1 \quad k_c = 1$
<p>CNR-DT200/2004 2004</p>	$P_{\max} = b_p \sqrt{2E_p t_p K_G K_p K_1 (f_t f_c)^{1/2}}$	$K_G = 0.03$

		$K_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } L \geq L_e \\ \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) & \text{if } L \leq L_e \end{cases}$ $L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2 f_t}}$ $K_b = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 - 0.33}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \leq 0.33 \\ \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \geq 0.33 \end{cases}$
--	--	--

2.2 Refuerzo de vigas con PRFC

Los modos de falla observados de las vigas de concreto reforzadas con láminas de PRFC han sido reportados por Teng et al (2003) y analizados posteriormente por Ferreira *et al* (2018). Informaron tres modos de falla típicos: (1) falla de tensión del PRFC cuando su resistencia a la tensión es menor que la carga aplicada; (2) separación del refuerzo en la interfase laminado-concreto; y (3) una falla cohesiva del concreto y hay una separación del refuerzo junto con una capa de concreto.

El primer modo de falla se atribuye a un modo de falla frágil, pero es evidente que la resistencia de la unión de PRFC-concreto es mayor. El segundo modo de falla se atribuye a la falta de anclaje del refuerzo, al agrietamiento excesivo de la viga o fallas en la unión. Nuevamente aquí, la falla de la resistencia de la unión adhesiva puede ser causada por esfuerzos normales al final de la tira de PRFC, donde se sabe que existe una singularidad de esfuerzos [Leung, 2001, A.R. Khan et al 2014 y R.A. Hawileh et al 2015].

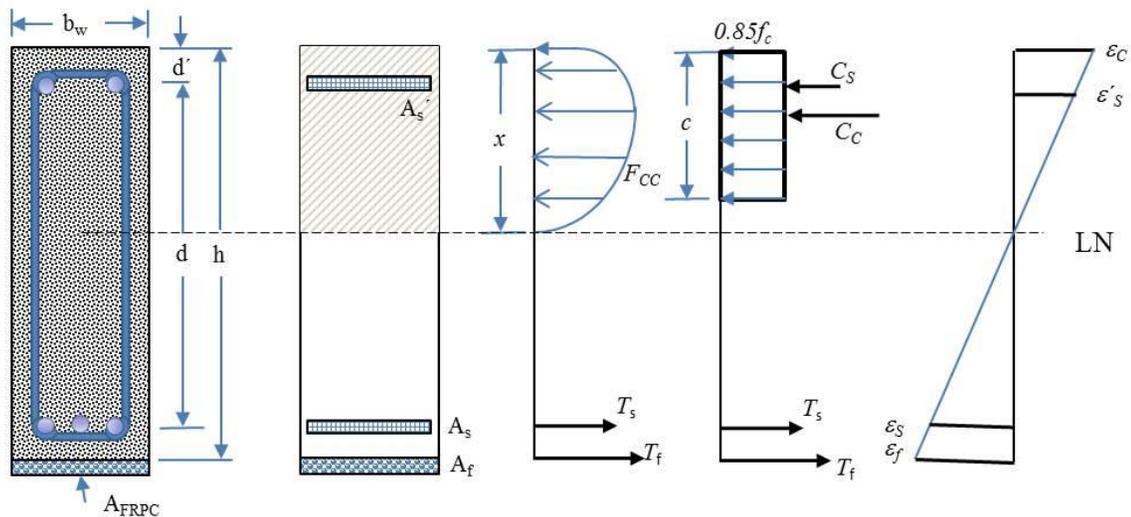


Figura 3. Diagrama de tensión de una viga de concreto reforzado con acero reforzado con PRFC (After Ferreira et al 2018)

El análisis del fortalecimiento de una viga de concreto con una capa de PRFC cargada en flexión presentada por Ferreira *et al* (2018) consideró que la relación del marco de la viga reforzada es

equivalente a la adición a la relación de refuerzo inicial con la contribución del refuerzo (ver figura 3).

$$\rho_r = \rho + \frac{A_f E_f}{b_w h E_s} \quad (10)$$

Donde ρ es la relación del refuerzo de la viga antes del refuerzo, A_f es el área de refuerzo aplicada a la viga, E_f es el módulo de elasticidad del PRFC, E_s es el módulo de elasticidad del acero, b_w y h son la anchura y la altura de la viga respectivamente. Las recomendaciones para el dimensionamiento del refuerzo de PRFC según el código estadounidense ACI 440-2R son las siguientes: El valor límite de la deformación de la fibra que se adoptará en el dimensionamiento y la verificación del refuerzo se expresa en términos del módulo de elasticidad del PRFC, y ε_{fu} , la deformación última observada en el polímero en el momento del fallo y n , el número de capas de PRFC.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{n E_f t_f}} < 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (11)$$

La deformación efectiva en el material compuesto PRFC, ε_{fe} , se expresa en función de la deformación última del concreto ε_{cu} y la deformación en el recubrimiento del refuerzo de tensión en la viga antes del reforzamiento, ε_{bi} y x , la posición del eje neutro.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (12)$$

f_{fe} es la resistencia efectiva del PRFC;

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (13)$$

ε_s' es la deformación en el refuerzo comprimido y, d' es la posición centroidal del refuerzo comprimido.

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(\frac{x-d'}{x} \right) \quad (14)$$

La deformación en el refuerzo de tensión., ε_s , se expresa por:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \left(\frac{d-x}{h-x} \right) \quad (15)$$

f_s' , la resistencia en el acero del refuerzo comprimido se da en función de la deformación en el refuerzo comprimido ε_s' y el módulo elástico en el acero;

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' \leq f_{ys}' \quad (16)$$

La resistencia en el acero del refuerzo de tensión. f_s se da por

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{ys} \quad (17)$$

La posición del eje neutro se calcula de la siguiente manera:

$$x = \frac{(A_s f_s) + (A_f f_{fe}) - (A_s' f_s')}{\beta_1 (0.85 f_c) b_w} \quad (18)$$

A_s es el área del acero del refuerzo de tensión.; A_s' es el área de acero del refuerzo comprimido; β_1 es un coeficiente que determina la aproximación de la curva de compresión resultante del concreto a un rectángulo, siendo 0.85 para el concreto con valores de f_c inferiores a 28 MPa, que disminuyen linealmente en 0.05 por cada 7 MPa por encima de ese límite de resistencia a la tensión. El valor mínimo para dicho coeficiente, según ACI 318 (2014), es de 0,65. Las condiciones en la interfaz entre el compuesto y el concreto requieren una compresión completa desde el punto de vista mecánico. Las diferentes formulaciones de resina epoxi o cualquier otro adhesivo utilizado darán como resultado un comportamiento completamente diferente de la adhesión entre el concreto y el material compuesto. Además, el diseño geométrico del laminado y los anclajes también influirá en el comportamiento mecánico y, en consecuencia, en la efectividad del refuerzo. Luego, como primer paso, siempre que sea posible, y dependiendo de la disponibilidad del equipo de prueba, se requieren estudios preliminares de los parámetros de adhesión entre el material compuesto y el concreto para determinar las longitudes de las uniones para la transferencia de tensión efectiva necesaria para lograr la capacidad de resistencia del compuesto.

2. EFECTOS AMBIENTALES EN LA RESISTENCIA DE LA ADHERENCIA EN LA INTERFAZ PRFC-CONCRETO

La interfaz en el concreto - PRFC ha sido reconocida como la región donde se lleva a cabo la eficiencia de la transferencia de carga desde el elemento estructural al laminado PRFC. Según lo declarado por Swamy RN et al (1987), las propiedades del adhesivo epoxi son de suma importancia ya que varían considerablemente con el grosor de la muestra de prueba y la velocidad de carga. De manera similar, la interfase entre la matriz y la fibra se considera una región importante del rendimiento del laminado compuesto.

Este comportamiento de la matriz en el concreto-PRFC es de particular interés en los materiales compuestos avanzados, ya que su uso en aplicaciones estructurales con exposición al medio ambiente requiere que el material cumpla con estándares de rendimiento, durabilidad y seguridad muy estrictos. El transporte de humedad en los sistemas poliméricos está relacionado con la disponibilidad de "espacio libre" o "volumen libre" de tamaño molecular en la estructura del polímero, así como su afinidad con el agua. [M.R. Vanlandingham, et al (1999)]. Dicha disponibilidad de "espacios libres" depende de la microestructura, morfología y densidad de reticulación, que son funciones del grado de curado, estequiometría, rigidez de las cadenas moleculares y la densidad de energía cohesiva del polímero. La afinidad entre el polímero y el agua está relacionada con la presencia de sitios de enlace de hidrógeno a lo largo de las cadenas del polímero que crean sitios de fuerzas atractivas entre las moléculas de agua y las del polímero. Las moléculas de agua que son libres de moverse a través de orificios o volumen libre se conocen como moléculas adsorbidas. En el caso de los epoxis, también se sabe que tienen un volumen libre significativo, particularmente a temperaturas de 50-150 ° C por debajo de la Tg. La afinidad epoxi-agua es relativamente fuerte porque los grupos hidroxilo polares (-OH) se crean por la apertura del grupo epoxi por reacción con aminas primarias y secundarias. [M. J. Adamson, 1736]. Luego, en el caso de estos materiales compuestos basados en fibras de carbono y matriz epoxi, las propiedades que están dominadas por la matriz o la interfaz fibra-matriz se degradan por la absorción de humedad, mientras que las dominadas por las fibras no se ven afectadas esencialmente. En Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) - Una revisión

particular, la resistencia al corte interfacial, la resistencia al corte interlaminar y, dependiendo de la secuencia de apilamiento de láminas de resina epoxi-fibra de carbono en el laminado, los efectos de borde también se convierten en puntos de posible inicio de falla así como la tenacidad a la fractura en modo II y la resistencia interlaminar. Esta degradación se atribuye al debilitamiento de la interfase fibra-matriz y al hinchamiento de la matriz y la plastificación de la matriz [J. I. Cauich-Cupul, et al (2011), E. Pérez-Pacheco, et al (2011), S. Wang et al, (2002), L.E. Asp, (1998), M. Todo, et al, (2000), R. Selzer et al, (1995), MJ Adamson, (1980), DA Bond, (2005), MR Vanlandingham, et al (1999)]. La absorción de humedad también puede causar una disminución de los esfuerzos residuales producidos a partir de los gradientes térmicos de curado y, por lo tanto, dar como resultado una disminución de las propiedades de fractura. Los efectos de la humedad se ven agravados considerablemente por la temperatura y se complican aún más por la acción de los esfuerzos mecánicos impuestos sobre el material. [J. B. Aguiar, et al (2008)].

Además, estos materiales compuestos están expuestos a diferentes condiciones ambientales durante su vida útil, como la humedad, la temperatura y la radiación ultravioleta y, por lo tanto, a la posibilidad de efectos sinérgicos sobre los mecanismos de degradación. Por lo tanto, siempre existe la preocupación de que la durabilidad a largo plazo de estos materiales esté expuesta a condiciones ambientales combinadas de humedad, temperatura y radiación ultravioleta. [Springer, G.S. (ed.) (1984), Ranby, B. y Rabek J. F., (1975)]. Tanto la radiación ultravioleta como la humedad tienen efectos negativos principalmente en las propiedades mecánicas de la resina epoxi y la interfaz fibra-matriz y, por lo tanto, afectan la integridad del compuesto [W. B. Liao, et al, 1998].

El tema de la durabilidad de los sistemas de refuerzo de FRPC, en general, ha sido una preocupación importante en las aplicaciones de rehabilitación estructural. El comportamiento de las vigas reforzadas con FRPC sometidas a ciclos de congelación-descongelación, seco-húmedad y temperatura o varias soluciones acuosas antes de la carga ha sido estudiado por un número limitado de investigadores (Bank, et al, 1995, Gheorghiu C. et al, 2004, Grace NF et al 2005, Wang C. Y, et al, 2004, Xie M., 1995, Katz A., 1999). Ha habido un cambio fundamental en el enfoque del tema. A diferencia de someter un material compuesto específico a una exposición ambiental durante un período de tiempo específico y luego realizar pruebas mecánicas para obtener "datos" para uso de diseño, el enfoque más reciente ha sido tratar de desarrollar un conjunto integrado de pruebas químicas y mecánicas que proporcionar una comprensión de los mecanismos de degradación dentro del material compuesto. Estos documentos combinan métodos de prueba macromecánicos con investigaciones de cambios en la composición del material junto con microscopía electrónica de barrido para desarrollar modelos que intentan explicar el cambio de las propiedades mecánicas en términos de los cambios cuantitativos en la naturaleza química de los materiales y la observación cualitativa del fenómeno de degradación. (Banco y Gentry, 1995).

Buyukozturk O, 1998 y Grace y Singh, 2005, y concluyeron que la exposición a largo plazo a la humedad es el factor más perjudicial para la resistencia de la unión entre las placas y tejidos PRFC y las vigas de CR. Las vigas reforzadas con placas de PRFC y expuestas a 10,000 horas de humedad del 100% (a 38 ± 2 ° C) experimentaron un promedio de reducción del 33% en su resistencia. El inicio de la delaminación fue el modo primario de falla para todos los haces de prueba.

La durabilidad de los pilotes pretensados de polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC) conducidos en aguas con mareas y un estudio experimental para evaluar el posible efecto del cambio de temperatura diurno/estacional en doce vigas pretensadas y preagrietadas de PRFC diseñados para fallar por ruptura de las varillas de pretensado se mantuvieron al aire libre en dos tanques de agua salada y simultáneamente, sometidos a ciclos húmedos/secos (simulando mareas) y ciclos de frío/calor (simulando la variación de la temperatura), (Aiello, et al, 2001). La durabilidad se evaluó a partir de pruebas de flexión realizadas periódicamente durante el período de exposición de casi 3 años. Los resultados de las pruebas indicaron que la durabilidad no se vio afectada en gran medida, aunque en algunas de las muestras expuestas se observaron degradación de los enlaces y reducciones en la capacidad final. La degradación parecía estar relacionada con la

magnitud del daño de pre-agrietado sufrido antes de la exposición. Esto sugiere que cuando se utilizan pilotes pretensados de PRFC, los esfuerzos de conducción deben controlarse cuidadosamente para minimizar el daño.

Debido al cambio en el comportamiento en diferentes condiciones ambientales, se puede decir que no se ha logrado una comprensión completa de los efectos que estos materiales tienen en el rendimiento de los sistemas de reacondicionamiento. En particular, no se conocen bien varios mecanismos de falla que puede manifestar la viga de concreto reconstruida, incluidos los mecanismos de desprendimiento y deslaminación de PRF de la viga de concreto. Se necesitan más estudios para desarrollar una mejor comprensión de la capacidad de corte de las secciones de modificación, los efectos en las regiones de anclaje del laminado de FRP y los mecanismos de falla de desprendimiento y delaminación. Los temas de estudios futuros también deben incluir los efectos de las compatibilidades del material y sus resistencias a la degradación a través de los ciclos ambientales y de carga, y la evaluación de la integridad del sistema modernizada mediante el uso de la evaluación no destructiva [Nakaba 2001].

En sentido estricto, la aplicación de una capa laminada de material compuesto reforzado con fibra en el lado de tensión de la viga, ya sea mediante la unión de un laminado o mediante la formación de un material compuesto in situ, utilizando la resina epoxi y las fibras orientadas de manera unidireccional en un tejido (una colocación manual) resultará en dos interfases, la interfase concreto-resina y la interfase matriz-fibra, como se muestra en la figura 4. Ambas interfases son susceptibles de verse afectadas por la exposición al medio ambiente. Sin embargo, en la literatura técnica sobre el tema de la modernización de vigas con RFPC, solo se hace referencia a la interfase concreto-laminado.

Karbhari e Engineer, 1996, investigaron la degradación de la interfaz compuesto-concreto después de la exposición a condiciones ambientales que incluyen humedad, agua de mar, congelación y descongelación. En esta investigación, el rendimiento de las vigas enchapadas se consideró a partir de aspectos relacionados con los materiales y la durabilidad. Se estudió el efecto de cinco condiciones ambientales diferentes y mostraron que la selección del sistema de resina apropiado es fundamental para el éxito y señalaron los peligros de seleccionar sistemas con bajas temperaturas de transición vítrea y caídas drásticas en el módulo instantáneo en función de la temperatura. Los resultados indicaron que la degradación se produce principalmente al nivel de la resina en contacto con el concreto, y que se debe tener cuidado de los cambios en la rigidez del material compuesto debido a la exposición a la humedad y la consiguiente plastificación de la resina, así como a los aumentos de rigidez en condiciones de frío. (Aiello, et al, 2001, Plevris N, 1999, Soudki KA 2000, Wang CY 2004).

Ji Cauich-Cupul et al, (2011) estudiaron el efecto de la absorción de humedad en la interfase en materiales compuestos de fibra de carbono IM7 epoxi-simple y mostraron un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas de la matriz, y este deterioro se atribuyó a una disminución de su temperatura de transición vítrea. Se estudiaron tres niveles de la interfaz de fibra de carbono-epoxi IM7. La primera fue la fibra de carbono IM7 con el tamaño eliminado, luego, el nivel de adhesión de la matriz de fibra se incrementó usando un agente de acoplamiento de silano para tratar la superficie de la fibra IM7 y la tercera, las fibras IM7 se trataron con ácido nítrico para producir más sitios de reacción química con el agente de acoplamiento de silano.

La calidad de la interfaz fibra-matriz se evaluó utilizando la prueba de fragmentación de una fibra única y la longitud del fragmento de fibra, considerada como un indicador de la calidad interfacial que mostraba un efecto de deterioro continuo de la absorción de humedad. Es decir, una longitud de fragmento de fibra corta indicaba que una interfase de matriz de fibra fuerte y una interfase de matriz de fibra débil (o deteriorada) estaban indicadas por una longitud de fragmento de fibra larga (ver figura 5). Además, el papel del hinchamiento de la matriz debido a la absorción de humedad en las tensiones residuales se considera importante cuando se considera el deterioro de las propiedades de corte interfacial. Se observó que la contribución de los esfuerzos radiales disminuía

rápidamente y el componente mecánico de la adhesión de la fibra a la matriz también disminuía rápidamente para mayores contenidos de humedad en la matriz y / o la interfaz.

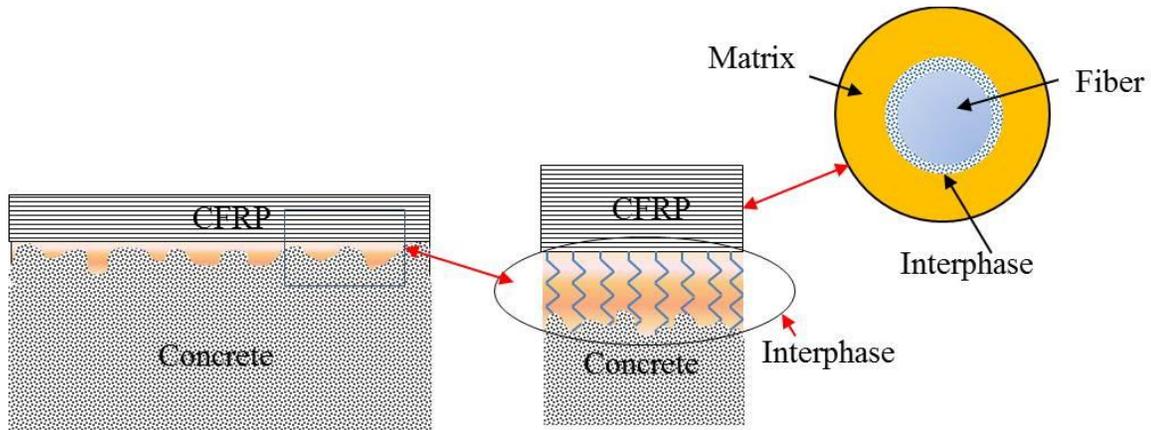


Figura 4. Representación esquemática de la formación de interfases duales formadas por el uso de laminados o telas para re-equipar vigas de concreto reforzado con acero. Una interfase concreto-resina y una interfase fibra-matriz.

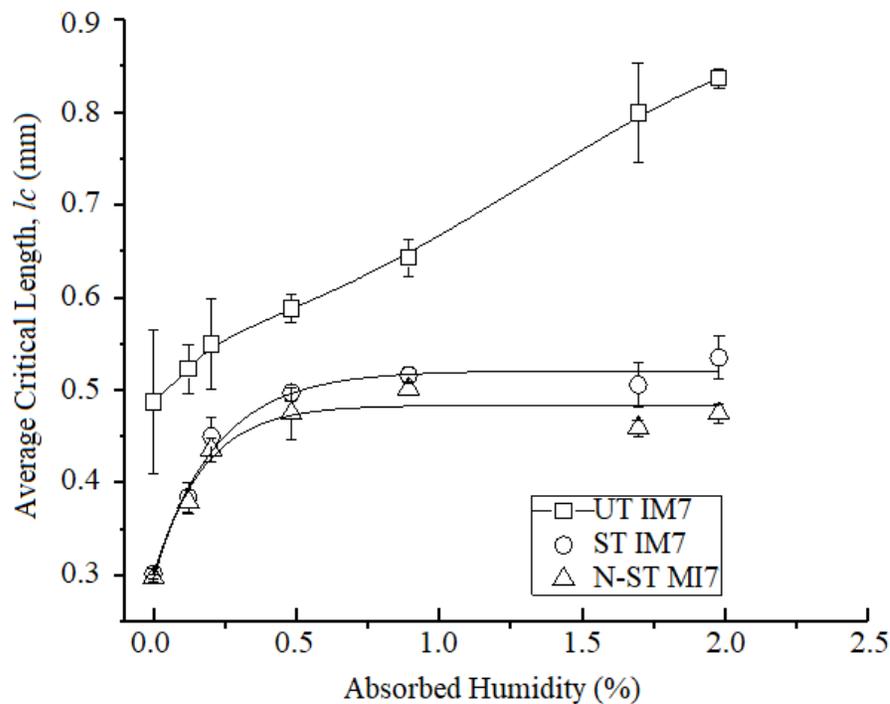


Figura 5. Longitud del fragmento de fibra en función de la humedad absorbida en la interfase matriz en el compuesto, para fibras de carbono de superficie no tratadas (UT IM7); fibras de carbono IM7 de superficie tratada con agente de acoplamiento de silano (ST IM7) y fibras de carbono IM7 de superficie tratada con agente de acoplamiento de silano (N-ST IM7), (J. I. Cauch-Cupul et al, (2011))

Perez-Pacheco, et al (2013) concluyeron que la microestructura de la interfase jugó un papel importante en el proceso de difusión de humedad en un laminado epoxi de fibra de carbono. La Figura 6 muestra las isotermas de absorción de humedad para un laminado compuesto sometido a varios ambientes de humedad relativa. También concluyeron que los efectos de la humedad absorbida en la región interfacial eran perjudiciales para la resistencia interfacial entre la fibra y la matriz epoxi y, por lo tanto, para el rendimiento del compuesto. El uso de 3-

glicidoxipropiltrimetoxisilano como agente de acoplamiento de fibra-matriz mejoró la adhesión de fibra-matriz. La plastificación, los esfuerzos de hinchamiento y la degradación de cualquier epoxi debido a la hidrólisis pueden haber contribuido a los mecanismos de falla de la matriz. La plastificación de la matriz epóxica por la humedad condujo al cambio en su temperatura de transición vítrea (Tg), afectando así la respuesta mecánica del compuesto. Se observó que la resistencia a la tensión de los laminados hechos con el agente de acoplamiento de silano mostró una disminución, pero después de una absorción de humedad de aproximadamente el 0,45%, la resistencia a la tensión se mantuvo constante. Luego, el uso de un agente de acoplamiento de silano adecuado para mejorar la adherencia resultó en mejores propiedades mecánicas y redujo la dependencia de las propiedades de la humedad bajo la carga de tensión (ver figuras 7 y 8).

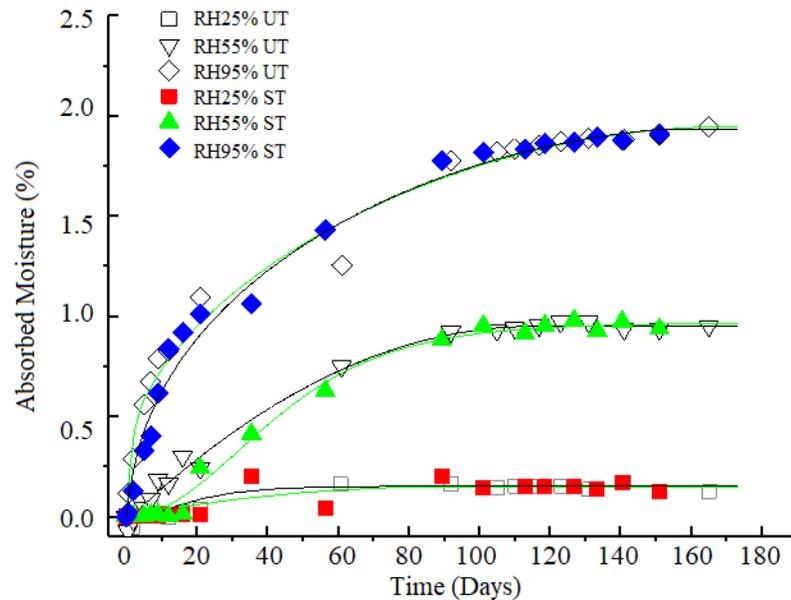


Figura 6. Absorción de humedad en el material laminado compuesto para diferentes ambientes de humedad relativa. Sin tratamiento: (UT) tratamiento de superficie de silano (ST). RH25% UT, RH55% UT y RH95% UT, y con fibras tratadas en la superficie de silano RH25% ST, RH55% ST y RH95% ST. (Pérez-Pacheco, et al (2013))

Figura 7. Comportamiento del módulo elástico con respecto a la humedad absorbida para el material compuesto con la fibra tratada y sin tratar, respectivamente. (Pérez-Pacheco, et al (2013))

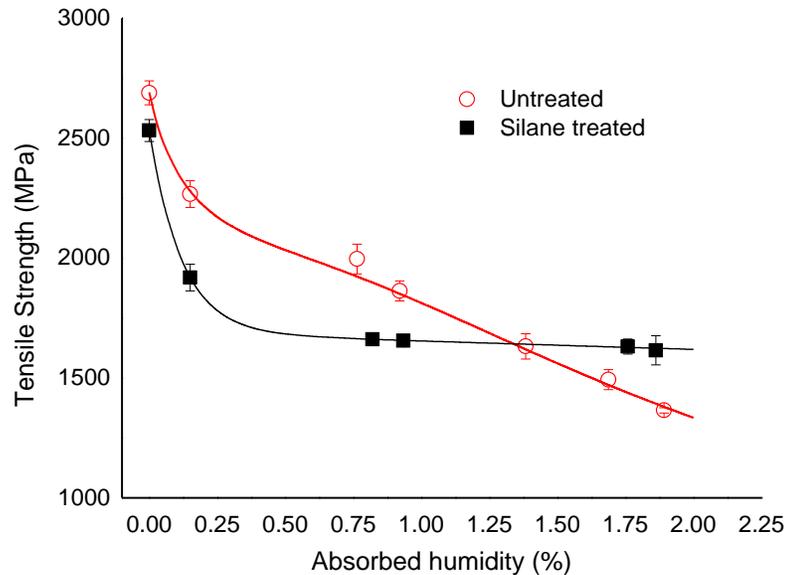


Figura 8. Resistencia a la tensión de un material PRFC fabricado en el material compuesto después de sufrir una degradación higroscópica, para dos condiciones de interfaz de fibra-matriz diferentes, es decir, para fibras tratadas y no tratadas, respectivamente (Perez-Pacheco, et al (2013))

Swamy RN et al, 1999 y Sebastian WM, 2001, demostraron que el comportamiento y el potencial de combinar la protección contra la corrosión y las técnicas de reparación con parches de FRP para modernizar las vigas de CR pre-agrietadas y dañadas por la corrosión y proporciona el espacio para recubrir los materiales de protección contra la corrosión. También propusieron que las tiras de anclaje en U equidistantes, junto con las tiras longitudinales, formen un sistema de refuerzo externo para que viga de CR corroído restrinja la extensión de grietas en el área de intersección con la fibra en la dirección longitudinal. Dado que el valor de la deformación es mayor en este sitio, permite el uso total de la resistencia del material compuesto fibroso. Por lo tanto, cualquier diseño que pueda reducir el efecto de la concentración de esfuerzos en el área de intersección de las tiras de anclaje longitudinales y en forma de U puede ayudar a que la viga escape del modo de falla prematura de rotura de la fibra y alcance su capacidad de carga diseñada.

Como puede verse, los problemas medioambientales son extremadamente importantes al diseñar una junta de laminado de concreto compuesto para la restitución de vigas. Todos los modelos descritos en el numeral 2.1 de este documento consideran las propiedades mecánicas del laminado compuesto, que, como se ve en las figuras 7 y 8, disminuyen en función de la humedad absorbida. Por lo tanto, el laminado compuesto debe diseñarse con dimensiones tales como grosor y ancho, adecuadas a los valores de rigidez y resistencia, ya sea las propiedades estimadas después de degradarse por la absorción de humedad o al incluir un factor de seguridad apropiado para las propiedades mecánicas del compuesto antes de la exposición al medio ambiente. Otro enfoque sería proporcionar un recubrimiento protector para evitar la absorción de humedad, especialmente en los bordes del laminado.

4. CONCLUSIONES

Un método eficaz para reforzar las vigas de concreto existentes en la flexión consiste en adherir laminados de material compuesto reforzados con fibra en las caras de tensión de las vigas. Sin embargo, a menudo es difícil desarrollar la capacidad de resistencia total del compuesto debido a un fallo prematuro por delaminación y desprendimiento del laminado. Las condiciones en la interfaz entre el compuesto y el concreto requieren una comprensión completa, y se requieren estudios preliminares de los parámetros de adhesión entre el compuesto y el concreto para

determinar las longitudes de transferencia de tensión efectiva necesarias para lograr la capacidad de resistencia del compuesto. También se ha incluido en esta revisión un análisis teórico del comportamiento de dichas uniones de material compuesto a concreto. La durabilidad de la interfase de material compuesto-concreto también es muy importante, especialmente cuando la estructura está expuesta al calor y la humedad juntos. En la literatura técnica, no se hace referencia a los dos problemas interfaciales, es decir, la interfase de resina polimérica-concreto y la interfase entre matriz y fibra en el material compuesto mismo. La durabilidad del laminado de material compuesto se ve afectada por la absorción de humedad, lo que resulta en una reducción de la resistencia y la rigidez superior al 30%.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Marista de Mérida por el amable apoyo brindado, al Sr. Poot Cauich y por proporcionar materiales para el trabajo experimental.

6. REFERENCIAS

- Adamson, M. J. (1980), *Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials*, Journal of Materials Science, Volume 15, I (7): 1736–1745, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00550593>
- Adhikary, B. B. and Mutsuyoshi, H., (2001). *Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet*, Proceedings of the 5th international symposium on fiber reinforced Concrete structures (FRPCRS-5), Thomas Telford Publishing, 371-378.
- Aguiar, J. B., Camoes, A. and Vaz, N. F. (2008), *Effect of temperature on RC elements strengthened with CFRP*. Materials and Structures 41:1133–1142, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9311-4>
- Aiello, M. A., Focacci, F., Nanni, A. (2001), *Effects of thermal loads on concrete cover of fiber-reinforced polymer reinforced elements: theoretical and experimental analysis*. ACI Materials Journal, 98(4):332–339.
- Bank, L. C., Gentry, T. R., Barkatt, A. (1995), *Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14(6), 559–587, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400602>
- Bizindavyi, L., Neale, K. W. (1999), *Transfer lengths and bond strength for composites bonded to concrete*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 3(4):153–160. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:4\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:4(153))
- Bond, D. A. (2005), *Moisture Diffusion in a Fiber-reinforced Composite: Part I – Non-Fickian Transport and the Effect of Fiber Spatial Distribution*, Journal of Composite Materials, Vol. 39(23): 2113-2141, <https://doi.org/10.1177/0021998305052030>
- Buyukozturk, O., Hearing, B. (1998), *Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP*. ASCE, Journal of Composites for Construction; 2(3):138–144, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:3\(138\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:3(138))
- Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2004), *Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*. Construction and Building Materials, 18:9-19, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00094-1)
- Camli, U. S. and Binici, B. (2007), *Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry*. Construction and Building Materials, 21:1431-1446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.003>

- Cauich-Cupul, J. I, Pérez-Pacheco, E., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of moisture absorption on the micromechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 46:6664–6672, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5619-0>
- Chajes, M. J., Finch, W. W., Januszka, T. F., Thomson, T. A. (1996), *Bond and force transfer of composite materials plates bonded to concrete*. ACI Structural Journal, 93(2): 208–217.
- Chen, F. J., Teng, G. J. (2001), *Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete*, Journal of Structural Engineering, 127(7): 784-791, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784))
- Cho, J.-R., Park, S. Y., Cho, K., Kim, S. T., Kim, B.-S. (2012) *Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector*, Canadian Journal of Civil Engineering, 39(12): 1311-1320, DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0573>
- CNR—Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (2004), “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures (CNR-DT 200/2004)*” Rome, Italy, 144 pp
- Dai, J. G., Ueda, T. and Sato, Y. (2006), *Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pull-out tests*. Journal of Advanced Concrete Technology, 4:133-145, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.4.133>
- De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3): 256-264.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima Neto, A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A., Freire, M. C. (2018), “*Influence of anchorage on flexural strength of beams strengthened with CFRP sheets*”, Revista ALCONPAT, 9 (1): 30 – 47, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>
- FIB (2001), *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, FIB bulletin 14 Technical Report.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., Raiche, A. (2004), *Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbon-fiber reinforced polymer*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):211–218, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(211))
- Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., Saleh, K. R. (1999), *Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminate*. ACI Structural Journal, 96(5):865–874.
- Grace N. F., Singh S. B. (2005), *Durability evaluation of carbon fiber-reinforced polymer strengthened concrete beams: experimental study and design*. ACI Structural Journal, 102(1):40–53.
- Hamoush, S. A., Ahmad, S. H. (1990), *Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams*. Materials and Structures; 23:116–125, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472571>
- Hamze-Ziabari, S. M. and Yasalovi, A. (2017), *Predicting bond strength between FRP plates and concrete substrate: Applications of GMDH and MNL approaches*, Journal of Advanced Concrete Technology 15: 644-661, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.15.644>
- Hawileh, R. A., Nawaz, W., Abdalla, J. A., Saqan, E. I. (2015), *Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams*, Composite Structures 122: 468–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>
- Japan Concrete Institute JCI. 2003. “*Technical report of technical committee on retrofit technology*.” Proc., Int. Symp. on the Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Sapporo, Japan
- Jeffries, J. M., (2004), *Bond behavior of fiber reinforced polymer laminates to concrete subjected to varied surface preparation*. Masters Theses. 2498.
- Karbhari, V. M., Engineer, M. (1996), *Effect of environmental exposure on the external strengthening of concrete with composite—short term bond durability*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 15:1194–1216., DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449601501202>

- Karbhari, V. M., Shulley, S. B. (1995), *Use of composites for rehabilitation of steel structures – determination of bond durability*. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, 7(4):239–245, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:4\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(239))
- Karbhari, V. M., Zhao, L. (1998), *Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening*. Composite Structures, 40(3-4):293–304, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00031-2)
- Katz, A., Berman, N., Bank, L. C. (1999), *Effect of high temperatures on bond strength of FRP rebars*. ASCE Journal of Composites for Construction, 3(2):73–81, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A. and Aziz, A. (1998). *Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC members*, Journal of Composites and Construction, ASCE, 2(4):195-203, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195))
- Khan, A. R. and Shamsoun, F. (2014), *Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Wraps with and without End Anchorages*, Procedia Engineering 77: 123 – 130, <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.011>
- Asp, L. E. (1998), *The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite*. Composites Science and Technology, Vol. 58, (6): 967-977, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00222-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00222-4)
- Leung, C. K. Y. (2001), *Delamination failure in concrete beams retrofitted with a bonded plate, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 13, Issue 2, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:2\(106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(106))
- Liau, W. B., Tseng, F. P. (1998), *The effect of long-term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites*, Polymer Composites, 19:440-445, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10118>
- Lorenzis, L. D., Miller, B., Nanni, A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3):256–264.
- Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005), *Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete*, Engineering Structures, 27: 920-937, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>
- Lu, X. Z., Ye, L. P., Teng, J. G. and Jiang, J. J. (2005), *Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete*. Engineering Structures, 27(4): 564-575, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.015>
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie Jr., J. W. (1999), *Moisture Diffusion in Epoxy Systems*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 71, 787-798, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A)
- Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y. Ueda, T. and Kakuta, Y. (1997). *A study on bond mechanism of carbon fiber sheet*, in Proceedings of 3rd international symposium on nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Sapporo, Japan Concrete Institute, 1:279-285
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1998), *Theoretical stress–strain model for confined concrete*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 114(8):1804–1826, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., Yoshizawa, H. (2001), *Bond behavior between fiber reinforced polymer laminates and concrete*. ACI Structural Journal, 98(3):359–367.
- Neubauer, U. and Rostasy, F. S. (1997), *Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates*. Proceedings of seventh international conference on structural faults and repairs, Edinburgh, ECS Publications, 1:109-118.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1997), *Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 23(7):903–911, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:7\(903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903))

- Pendhari, S. S., Kant, T., Desai, Y. M. (2008), *Application of polymer composites in civil construction: A general review*. Composite Structures 84:114–124, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.007>
- Pérez-Pacheco, E., Cauich-Cupul, J. I., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J. (2013), *Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 48:1873–1882, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6947-4>
- Pérez-Pacheco, E., Moreno-Chulim, M. V., Valadez-González, A., Rios-Soberanis, C. R. and Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of the interphase microstructure on the behavior of carbon fiber/epoxy resin model composite in a thermal environment*, Journal of Materials Science, 46:4026–4033, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5331-0>
- Plevris, N., Triantafillou, T. C., (1994), *Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 120(3):1016–1042, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(1016))
- Selzer, R. and Friedrich, K. (1995), *Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites*. Journal of Materials Science, Vol. 30, No. 2, 334, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00354392>
- Saadatmanesh, H., Tannous, F. E. (1999). *Long term behavior of aramid fiber reinforced plastic (AFRP) tendons*. ACI Materials Journal, 96(3):297–305.
- Sebastian, W. M. (2001), *Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 127(7):792–798, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792))
- Springer, G. S. (1984), *Environmental Effects on Composite Materials*, Vol. 1, Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc.
- Swamy, R. N., Jones, R., Bloxham, J. W. (1987), *Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates*. Structural Engineer, 65(2):59–68.
- Swamy, R. N., Mukhopadhyaya, P. (1999), *Debonding of carbon-fibre-reinforced polymer plate from concrete beams*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 134:301–317, DOI: <https://doi.org/10.1680/istbu.1999.31897>
- Täljsten, B. (1997), *Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 17(4):319–327, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00018-3)
- Tanaka, T., (1996), *Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement*, Thesis (PhD). Hokkaido University.
- Lim, T.-Y., Paramasivam, P. and Lee, S.-L. (1987), *Behavior of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams in Flexure*. Journal of Structural Engineering; 113-12:2439. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:12\(2439\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:12(2439))
- Todo, M., Nakamura, T. and Takahashi, K. (2000), *Effects of moisture absorption on the dynamic interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy composites*. Journal of Composite Materials, 34(8): 630–648, DOI: <https://doi.org/10.1177/002199830003400801>
- Van Gemert, D. (1980), *Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 1, 67-72(1. 996), DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(80\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(80)90060-3)
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie, J. W. Jr., (1999), *Relationships between Stoichiometry, Microstructure, and Properties for Amine-Cured Epoxies*, Journal of Applied Polymer Science; 71: 699–712, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D)
- Wang, C. Y., Shih, C. C., Hong, S. C., Hwang, W. C. (2004), *Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):219–28, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(219))

- Wang, S. and Chung, D. D. L. (2002), *Effect of moisture on the interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurement*, Composite Interfaces, Vol. 9, No. 5: 453-458, DOI: <https://doi.org/10.1163/15685540260256546>
- Xie, M., Hoa, S. V., Xiao, X. R. (1995), *Bonding steel reinforced concrete with composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14:949–63, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400903>
- Yuan, H., Wu, Z. and Yoshizawa, H. (2001), *Theoretical Solutions on Interfacial Stress Transfer of Externally Bonded Steel/Composite Laminates*. Doboku Gakkai Ronbunshu, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, 18 (675): 1-55, DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675_27

Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana

R. A. Medeiros-Junior^{1*} , G. S. Munhoz¹ , M. H. F. Medeiros¹ 

*Autor de Contacto: medeirosjunior.ufpr@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepción: 16/07/2018 | Aceptación: 27/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Pedro Garcés Terradillos

RESUMEN

Esta investigación correlaciona las siguientes propiedades: absorción de agua (por inmersión y capilaridad), resistividad eléctrica y resistencia a compresión. Se ensayaron dos tipos de hormigones con cementos diferentes. Los resultados mostraron que los hormigones con mayor contenido de puzolanas y relación agua-cemento menor que 0,60, presentaron mayor resistividad y absorción por capilaridad. Ese comportamiento se atribuye a la reducción del diámetro de los poros. Por otro lado, en los hormigones con relación agua/cemento de 0,60, pero con menor contenido de puzolanas, también se observó un aumento de la absorción por capilaridad. Como esperado, la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica fueron inversamente proporcionales a la relación agua/cemento, en cuanto que la absorción por inmersión y capilaridad se mostraron directamente proporcionales a la relación agua/cemento. Las correlaciones encontradas entre los ensayos tuvieron altos coeficientes de determinación.

Palabras clave: durabilidad; concreto; absorción; Resistividad; resistencia a la compresión.

Citar como: Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), “Correlaciones entre absorción de agua, Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión de concreto con diferentes contenidos de puzolana”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 152 – 166, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

¹ Department of Civil Construction, Federal University of Parana - UFPR, Curitiba, Brasil.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan

ABSTRACT

This research confronts the following concrete properties: water absorptions (by immersion and capillarity), electrical resistivity and compressive strength. Concrete mixtures with two types of cement were tested. Results showed that concretes with higher content of pozzolan had higher resistivity and greater absorption by capillarity, for water/cement ratios lower than 0,60. This behavior is attributed to reduced pore diameters and microstructure densification. However, for water/cement ratio of 0,60, concrete with lower content of pozzolan presented higher absorption by capillarity. It was observed that the compressive strength and the electrical resistivity behaved inversely proportional to the water/cement ratio, and the absorption by immersion and capillarity are directly proportional to the water/cement ratio. Correlations with high determination coefficients were found between tests.

Keywords: durability; concrete; absorption; resistivity; compressive strength.

Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana

RESUMO

Essa pesquisa confronta as seguintes propriedades do concreto: absorção de água (por imersão e capilaridade), resistividade elétrica e resistência à compressão. Concretos com dois tipos de cimento foram ensaiados. Os resultados mostraram que os concretos com maior teor de pozolana apresentam maior resistividade e absorção por capilaridade, para relação água/cimento menor que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução no diâmetro dos poros. No entanto, para relação água/cimento de 0,60, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade. Ademais, a resistência à compressão e a resistividade elétrica são inversamente proporcionais a relação água-cimento, enquanto que a absorção por imersão e capilaridade são diretamente proporcionais a relação água/cimento. Correlações com elevados coeficientes de determinação foram encontradas entre os ensaios.

Palavras-chave: durabilidade; concreto; absorção; resistividade; resistência à compressão.

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras de concreto tiene impacto directo en la economía de la industria de la construcción civil. Por lo tanto, es esencial comprender los mecanismos que causan la degradación de esas estructuras. Algunas de las principales variables que controlan los procesos de degradación en el concreto son la Resistividad eléctrica, la absorción de agua y la porosidad. La Resistividad eléctrica puede ser correlacionada con la velocidad de corrosión y su nivel de deterioro, en cuanto a las absorciones de agua (por inmersión y capilaridad) pueden ser directamente relacionadas a la difusividad de iones agresivos en la microestructura del concreto. Además de eso, la porosidad (tamaño de los poros, conectividad y tortuosidad) es, también, un aspecto importante que puede influir en todas esas propiedades, incluyendo la resistencia a la compresión (Hornbostel et al., 2013; Ye et al., 2017).

Ramezaniyanpour et al. (2011) estudiaron la relación entre la Resistividad del concreto, la absorción de agua, y la penetración de cloruros y la resistencia a la compresión, a fin de ofrecer un mejor entendimiento sobre esas propiedades. Los autores concluyeron que la Resistividad, la absorción

de agua y la penetración de cloruros pueden ser correlacionadas. Entre tanto, al contrario de lo esperado, la resistencia a la compresión no puede expresar una correlación clara con la Resistividad eléctrica, una vez que ambos parámetros tienen variables (como el tipo de cemento) que no fueron contabilizados en el estudio. Por lo tanto, el presente artículo intenta aclarar esa laguna con el estudio de cementos con diferentes contenidos de puzolana.

Aún en esa perspectiva, Andrade y D'Andrea (2011), Silva et al. (2011), Ait-Mokhtar et al. (2013) y Sengul (2014) también estudiaron extensivamente esas correlaciones. De acuerdo con sus investigaciones, debido a la relación existente entre la porosidad, permeabilidad, nivel de saturación, resistencia mecánica, penetración de cloruros y la difusividad, la Resistividad eléctrica puede ser muy conveniente para la previsión de vida útil de los elementos de concreto.

La influencia de diferentes tipos de cemento y adiciones minerales en las propiedades físico-eléctricas del concreto fué investigada en diversos estudios (López y Castro, 2010; Yildirim et al., 2011; Lübeck et al., 2012; Hoppe Filho et al., 2013; Medeiros-Junior y Lima, 2016). Algunos de ellos ensayaron sustituciones parciales de cemento por escoria de alto horno, sílica activa y ceniza volante. En general, los autores concluyeron que mayores coeficientes de Resistividad eléctrica y menores absorciones de agua fueron encontrados en concretos con sustituciones parciales por adiciones minerales debido al refinamiento de los poros, que reducen la conectividad. Sin embargo, los efectos aún no son totalmente comprendidos. El curado del concreto, por ejemplo, puede desempeñar un papel importante en esas relaciones. Presuel-Moreno et al. (2013) y Sabbag y Uyanik (2018) concluyeron que el proceso de curado influye en la permeabilidad del concreto, reflejando en mayores velocidades de absorción de agua y Resistividad eléctrica, y menor resistencia a la compresión. Según esos autores, mejores resultados fueron encontrados cuando probetas de prueba fueron curados inmersas en agua ó al menos, almacenados en la cámara húmeda. El objetivo de esa investigación es estudiar las posibles correlaciones entre la absorción de agua del concreto (por inmersión y capilaridad), la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión, comparando dos tipos de cemento con diferentes contenidos de ceniza volante (12,5% y 27,0%). Por tanto, ese estudio procura determinar la intensidad de las correlaciones entre esas variables por medio de los coeficientes de correlación y como esas relaciones son afectadas por los diferentes contenidos de puzolana.

Finalmente, los resultados obtenidos con esa investigación serán útiles para mejor comprender la relación entre los parámetros asociados a la durabilidad de las estructuras de concreto y su resistencia a la compresión, que es la principal variable en el control de calidad de proyectos y en la construcción de edificios.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

En ese estudio, dos mezclas con diferentes contenidos de puzolana fueron ensayadas. La Dosis I, compuesta por cemento Portland IP modificado con puzolana (12,5% de ceniza volante) y la Dosis II, compuesta por cemento Portland-puzolánico IP-MS (27,0% de ceniza volante). La composición química y las propiedades físicas de ambos cementos están listadas en la Tabla 1. Además de eso, las principales características de los agregados fino y grueso son mostrados en la Tabla 2. Arena natural fue utilizada como agregado fino, proveniente del Rio Iguacu, Porto Amazonas.

Tabla 1. Características mecánicas, físicas y químicas del cemento.

Propiedades y Características	Unidad	Dosis I: Cemento Portland Modificado	Dosis II: Cemento Portland Puzolánico
Contenido de ceniza volante	%	12,5	27,0
Al ₂ O ₃	%	6,22	9,77
SiO ₂	%	21,98	29,17
Fe ₂ O ₃	%	3,08	3,84
CaO	%	54,46	45,04
MgO	%	3,68	2,94
SO ₃	%	2,54	2,27
Pérdida al fuego	%	5,40	3,54
CaO libre	%	0,66	0,61
Residuos insolubles	%	11,04	25,62
Contenido alcalino (Na ₂ O e K ₂ O)	%	0,85	1,15
Expansibilidad	mm	0,24	0,26
Tiempo de inicio de pega	h:min	4:20	4:26
Tiempo de fin de pega	h:min	5:06	5:11
Blaine	cm ² /g	3.560	4.193
# 200	%	1,83	0,49
# 325	%	8,33	2,78
Resistencia a compresión (1 día)	MPa	11,8	13,0
Resistencia a compresión (3 días)	MPa	25,3	25,9
Resistencia a compresión (7 días)	MPa	32,1	32,9
Resistencia a compresión (28 días)	MPa	41,0	45,4

Tabla 2. Características de los agregados utilizados.

Características dos agregados	Unidad	Dosis I		Dosis II	
		Fino	Grueso	Fino	Grueso
Tipo	-	Arena natural	Piedra basáltica	Arena natural	Piedra granítica
Dimensión Máxima Característica	mm	2,36	19	2,36	19
Peso específico	g/cm ³	2,35	2,71	2,65	2,71
Absorción de agua	%	1,88	0,40	0,70	0,20

De acuerdo con Bem et al. (2018), los aditivos químicos pueden afectar las propiedades eléctricas del concreto. Por lo tanto, no fueron utilizados en esta investigación. La dosis en peso, de las mezclas de concreto fue fijada en 1:1,4:2,1 (cemento: agregado fino: agregado grueso). El consumo (kg/m³) de los materiales utilizados en cada dosis es mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosis de los especímenes de concreto.

Código	Dosis I			Dosis II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Cemento (kg/m³)	489,8	480,0	470,6	484,9	471,2	458,3	446,0
Agregado fino (kg/m³)	685,7	672,0	658,8	678,9	659,7	641,5	624,4
Agregado grueso (kg/m³)	1028,6	1008,0	988,2	1018,3	989,5	962,3	936,6
Agua (kg/m³)	195,9	240,0	282,4	203,7	226,2	247,5	267,6
Relación agua/cemento	0,40	0,50	0,60	0,42	0,48	0,54	0,60

Las probetas de prueba de concreto son en muestras cilíndricas, que miden Ø100 mm x 200 mm de altura. Esa geometría fue seleccionada debido a los datos tabulados del factor de corrección de forma, que es necesario para determinar la Resistividad eléctrica. De acuerdo con la norma UNE 83988-2 (2014), para esa geometría, el factor es 0,377.

Los concretos fueron vaciados siguiendo las recomendaciones de la norma brasileña NBR 5738 (2015). Así que pasadas 24 horas posterior al vaciado, las muestras fueron desencofradas y curadas en cámara húmeda (humedad relativa $\geq 95\%$ y temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) por 28 días. Finalmente, tres probetas de prueba fueron utilizadas para cada ensayo realizado, los resultados discutidos en ese estudio son el promedio de tres repeticiones.

2.2 Métodos

2.2.1 Resistividad eléctrica

El ensayo no destructivo de Resistividad eléctrica fue realizado de acuerdo con la norma europea UNE 83988-2 (2014), que establece la configuración del experimento para la técnica de cuatro pines (método de Wenner). En ese ensayo, cuatro electrodos son colocados sobre la superficie de la muestra. Entonces el concreto es sometido a una corriente eléctrica aplicada entre los dos electrodos externos. De esa forma, la diferencia resultante en el potencial eléctrico puede ser medida por los dos electrodos internos. Para cada muestra fueron necesarias tres medidas con un ángulo de 120° de distancia entre ellas. Las probetas estaban en condición saturada con superficie seca durante el experimento.

2.2.2 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en las mismas probetas utilizadas en los experimentos de Resistividad eléctrica. Además de eso, los procedimientos de ensayo fueron cumplidos según lo descrito en la norma brasileña NBR 5739 (2018). En ese contexto, las muestras fueron colocadas en la prensa hidráulica, donde fueron cargadas por compresión hasta la ruptura. Durante el ensayo, fue utilizado un equipo con capacidad de carga de 1000 kN, con velocidad de carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

2.2.3 Absorción de agua por inmersión

El ensayo de absorción de agua por inmersión, realizado apenas para las muestras de la Dosis II, obedeció a las consideraciones de la norma brasileña NBR 9778 (2009). El experimento tuvo inicio con el secado de las muestras en estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), hasta la variación de peso ser menor que 0,10 g. Seguidamente al peso seco en estufa fue registrada. En la secuencia, las probetas fueron sumergidas en agua durante 72 horas. La inmersión fue realizada de acuerdo con la norma brasileña: 1/3 de la altura de las muestras sumergidas en las primeras 4 horas, 2/3 en las 4 horas siguientes y finalmente, la inmersión total de la muestra de concreto en las 64 horas restantes. Así, la velocidad de absorción de agua por inmersión, en porcentaje, representa la diferencia entre el peso de la muestra posterior a la inmersión (72h) y su peso seco en la estufa.

2.2.4 Absorción de agua por capilaridad

El objetivo de ese procedimiento es monitorear el aumento de peso de las muestras debido a la absorción de agua por capilaridad. De esa forma, el ensayo es iniciado con el secado de las muestras en la estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), hasta la variación de peso ser menor que 0,10 g, según la NBR 9779 (2012). Después de ello, las probetas fueron colocadas en una capa de agua de (5 ± 1) mm, con fondos expuestos, y sus pesos fueron tomados luego de 3, 6, 24, 48 y 72 horas de exposición. Esas medidas también fueron usadas para determinar la absorptividad (S), de acuerdo con la ecuación 1.

$$S = \frac{V_{\text{agua}}}{A \times \sqrt{t}} \quad (\text{Eq.1})$$

Donde, V_{agua} representa el volumen de agua absorbida por capilaridad, en mm^3 ; A representa el área de la cara de muestra en contacto con el agua, en mm^2 ; y t es el período de exposición, en horas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Resistividad eléctrica y resistencia a compresión

La Tabla 4 muestra la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión para cada dosis y relación agua/cemento, a los 28 días. De acuerdo con la Tabla 4, cuanto mayor es la relación agua/cemento, menor la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión. A medida que la relación agua/cemento aumenta, la porosidad interna de la microestructura del concreto y su conectividad también aumentan. Por tanto, cuanto mayor es la permeabilidad del concreto, menor es la resistencia mecánica, así como la resistencia al flujo de corriente eléctrica. Ese comportamiento ya fue constatado por varios estudios (Mehta y Monteiro, 2006; Ait-Mokhtar et al., 2013; Olsson et al., 2013).

Tabla 4. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Código	Dosis I			Dosis II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Resistividad eléctrica (kΩ.cm)	8,3	5,5	4,3	14,9	11,5	9,7	8,7
Resistencia a compresión (MPa)	45,2	33,2	21,4	49,3	41,0	32,0	27,9

Medeiros-Junior y Lima (2016) y Yu et al. (2017) también comentaron que el aumento de la relación agua/cemento con el aumento de la porosidad de las probetas de prueba. De esa forma, la resistencia al flujo de corriente eléctrica disminuye cuando más agua esté presente, dentro de los poros de concreto. Para garantizar eso, fue realizado el ensayo de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) en las muestras G0,42 e G0,54. Los resultados mostraron que la porosidad fue de 23,6% y 36,3%, respectivamente. Además de eso, los diámetros promedio de los poros fueron de 43,9 nm y 48,8 nm, para cada concreto ensayado.

La Dosis II presentó los mayores valores de Resistividad y resistencia a la compresión entre las mezclas probadas (Tabla 4). La mayor cantidad de puzolana en la Dosis II contribuyó con el refinamiento de los poros, restringiendo su conectividad. Este efecto contribuyó directamente para la reducción de la permeabilidad y aumentó la resistencia contra el flujo de corriente eléctrico. Resultados semejantes fueron encontrados por López y Castro (2010), Yildirim et al. (2011) y Medeiros-Junior et al. (2014). Además de esto, la sustitución parcial del cemento por puzolana resultó en el consumo de hidróxido de calcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - en una combinación química denominada Reacción Puzolánica. Ese proceso hidrata las mezclas cementíceas de forma gradual y lenta,

contribuyendo para el aumento de la resistencia mecánica a lo largo del tiempo, según comprobaron Medeiros-Junior y Lima (2016).

Finalmente, a fin de confirmar las diferencias observadas en los resultados obtenidos para cada tipo de cemento adoptado, los valores de la Tabla 4 fueron sometidos a un tratamiento estadístico. El Análisis de Varianza (ANOVA) con factor único y significancia de 5% demostró que la Resistividad eléctrica y la resistencia a compresión fueron estadísticamente diferentes para cada grupo ensayado.

En un gráfico con curvas para cada dosis, se correlacionó la Resistividad eléctrica con la resistencia a la compresión (Figura 1). Además de eso, para describir el comportamiento de esas variables, se optó por un tratamiento logarítmico. Ese fue el mejor ajuste de datos, y también fue utilizado por otros estudios (Andrade y D'Andrea, 2011; Wei y Xao, 2014; Medeiros-Junior et al., 2014).

En la Figura 1, ambos parámetros son directamente proporcionales, es decir, cuanto mayor la resistencia a la compresión, mayor la Resistividad eléctrica. Ese comportamiento también fue observado por Dinakar et al. (2007) y Lubeck et al. (2012), y está relacionado con la clara influencia que la porosidad tiene sobre ambas propiedades. Además de eso, la buena correlación gráfica mostrada en la Figura 1 (ambos R-cuadrado encima de 0,98) reafirma esa relación.

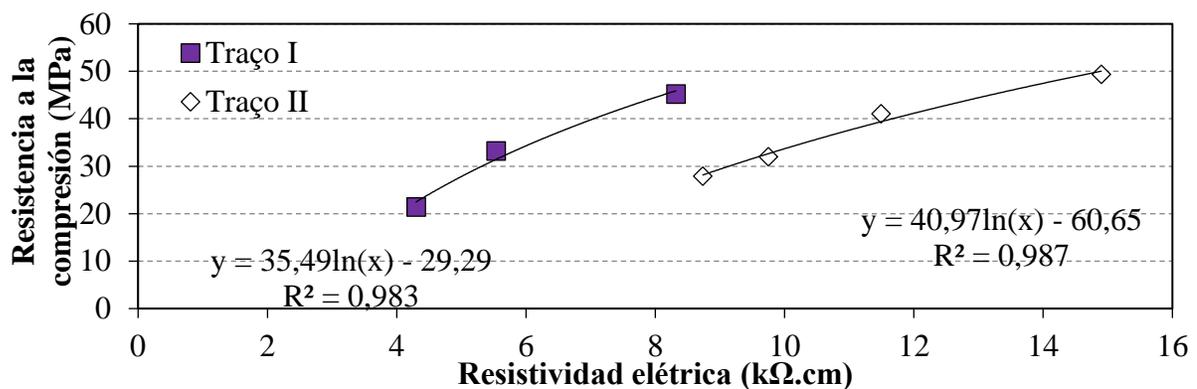


Figura 1. Correlación entre Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Además de eso, cuando ambas mezclas son comparadas con el mismo rango de resistencia a compresión, también puede ser observado que la curva de correlación para la Dosis II tiene una inclinación más suave. Eso se debe al mayor contenido de puzolana en la Dosis II, que crea una microestructura más densa con mayor Resistividad eléctrica.

3.2 Absorción de agua por inmersión

Las absorciones de agua por inmersión fueron de 3,67%, 4,32%, 5,69% y 6,36% para las muestras G0,42, G0,48, G0,54 y G0,60, respectivamente. Por tanto, a medida que la relación agua/cemento aumentó, también aumentaron los coeficientes de absorción. Esto ya había sido observado por Zhang y Zong (2014), Castro y Ferreira (2016), Gans (2017) y Pinto et al. (2018), y se debe, principalmente, a la porosidad en la microestructura del concreto y a su permeabilidad, una vez que ambos son parámetros significativamente influenciados por la relación agua/cemento.

Además de eso, de acuerdo con el Comité Euro-International du Béton (CEB 192, 1989), el concreto puede ser cualitativamente clasificado como bueno, mediano o malo de acuerdo con el nivel de absorción por inmersión. La Figura 2 correlaciona los resultados obtenidos por medio de los experimentos con tales niveles. En la Figura 2, en cuanto las mayores relaciones agua/cemento (0,60 y 0,54) están asociadas a un concreto de baja calidad, los valores más bajos de ese parámetro (0,42 y 0,48) permiten clasificar al concreto de una calidad promedio.

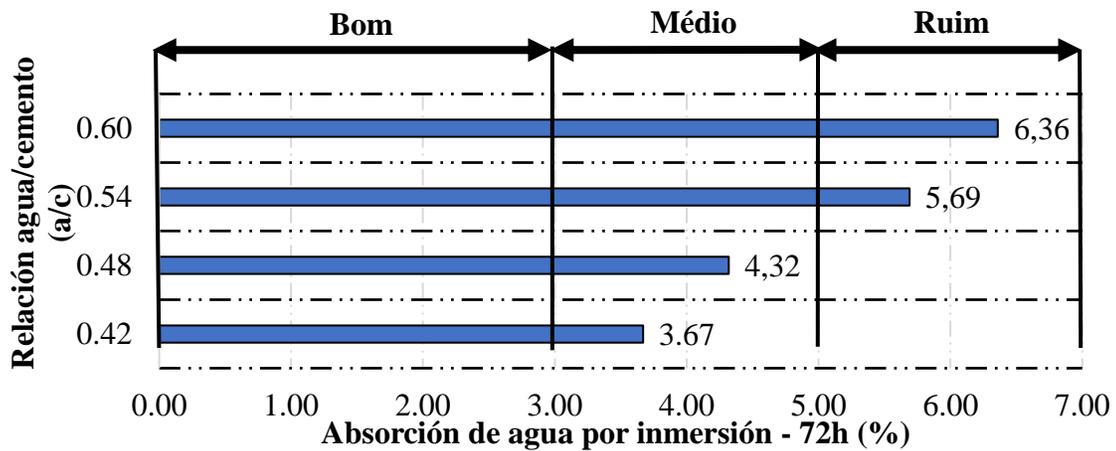


Figura 2. Absorción de agua por inmersión y calidad del concreto de acuerdo con los criterios propuestos por la CEB192 (1989).

La Figura 3 muestra la correlación entre la absorción de agua por inmersión y la Resistividad eléctrica. Similarmente la Figura 1 un método logarítmico describió mejor el comportamiento de ambas variables.

La buena correlación obtenida en la Figura 3 retrata el comportamiento inverso entre la absorción de agua por inmersión y la Resistividad eléctrica. Así, el agua absorbida en la microestructura de concreto aumenta su conductividad eléctrica y, en consecuencia, reduce su Resistividad eléctrica. La Figura 4 correlaciona la absorción de agua por inmersión y la resistencia a la compresión, usando un método logarítmico.

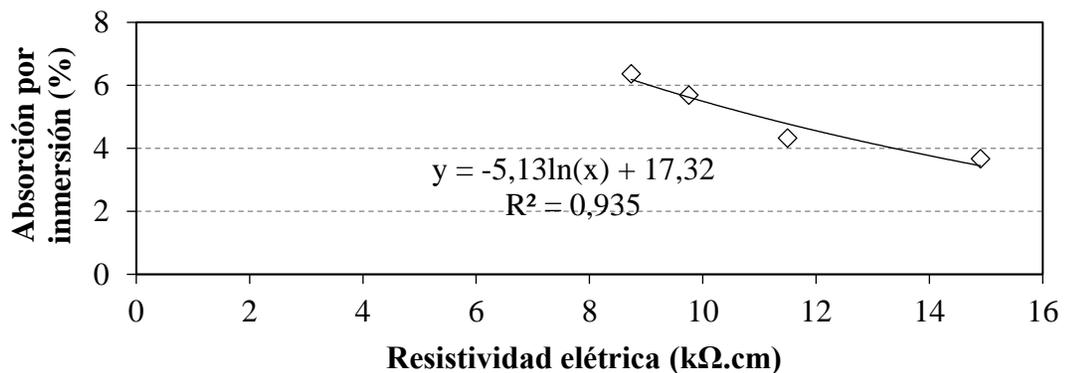


Figura 3. Correlación entre la Resistividad eléctrica y la absorción por inmersión.

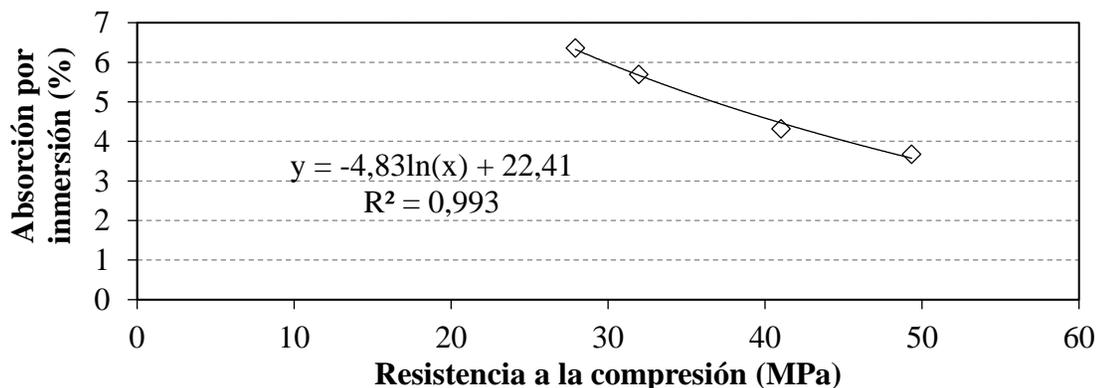


Figura 4. Correlación entre resistencia a compresión y absorción por inmersión.

De acuerdo con la Figura 4, a medida que la absorción de agua por inmersión aumenta, la resistencia a la compresión disminuye. Las curvas de la Figura 3 y de la Figura 4 tienen el mismo comportamiento, ya que los parámetros que influyen esos ensayos son semejantes. Por tanto, cuanto mayor la relación agua/cemento, mayor es la porosidad y su conectividad. Ello implica la reducción de la resistencia a la compresión y Resistividad eléctrica, en cuanto la absorción de agua por inmersión es aumentada.

En resumen, comparando los valores de R-cuadrado de ambos gráficos (Figuras 3 y 4), se puede notar que la absorción de agua por inmersión es mejor correlacionada con la resistencia a la compresión, que con la Resistividad eléctrica. Eso puede estar relacionado con la dependencia que la Resistividad eléctrica tiene con la composición química de la solución presente dentro de los poros del concreto (Ramezani-pour et al., 2011; Presuel-Moreno et al., 2013; Sabbag y Uyanik, 2018). Ese comportamiento explica la baja dispersión obtenida en la curva de regresión mostrada en la Figura 3, aunque haya sido encontrado un alto coeficiente R-cuadrado ($R^2 = 0,935$).

3.3 Absorción de agua por capilaridad

En las Figuras 5 y 6 muestran la variación da agua absorbida por capilaridad a lo largo del tiempo para la Dosis I y II, respectivamente. La absorción de agua por capilaridad aumentó a lo largo de la exposición de 72 horas, en ambas mezclas. No en tanto, la medida que la muestra aproximó su capacidad máxima de absorción, una tendencia de estabilización fue identificada. Ese comportamiento puede ser observado por diferentes inclinaciones en las curvas a lo largo del tiempo. Generalmente, el aumento en el nivel de absorción fue mayor en las primeras 12 horas del experimento.

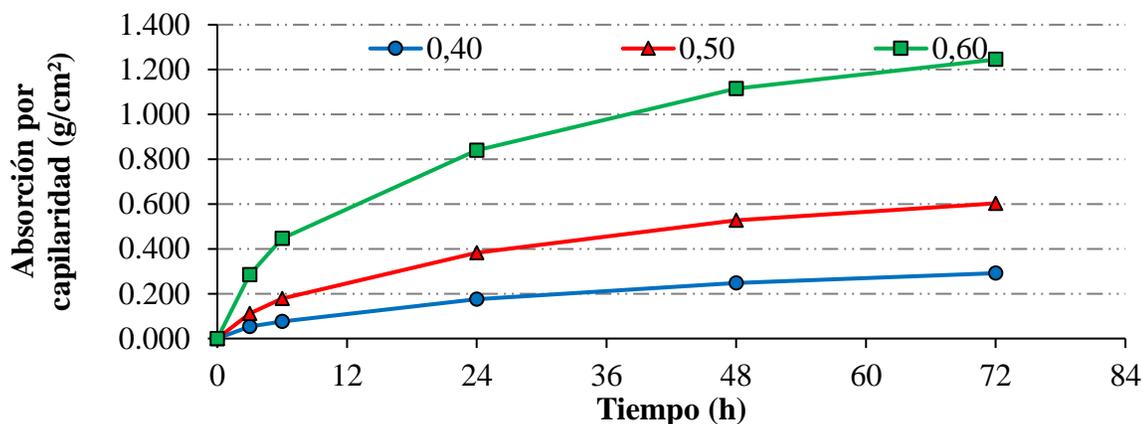


Figura 5. Absorción por capilaridad a lo largo del tiempo - Dosis I.

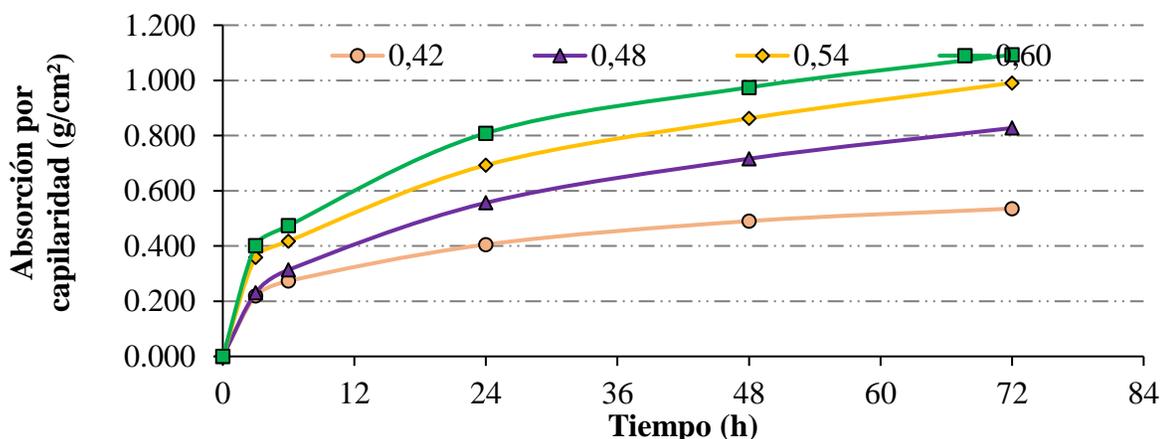


Figura 6. Absorción por capilaridad a lo largo del tiempo - Dosis II.

Además de eso, la absorción de agua por capilaridad aumentó con la relación agua/cemento. De esa forma, según fue comprobado anteriormente por el ensayo MIP, un concreto más poroso contribuye directamente con la absorción y percolación del agua.

Además, a fin de determinar la absorptividad del concreto, los resultados obtenidos con la absorción por el experimento de capilaridad fueron usados en la ecuación (1). La absorptividad de las probetas varió de 0,034 a 0,147 g/(cm².min^{1/2}). La Figura 7 ilustra la correlación y la variación de ese parámetro de acuerdo con la relación agua/cemento.

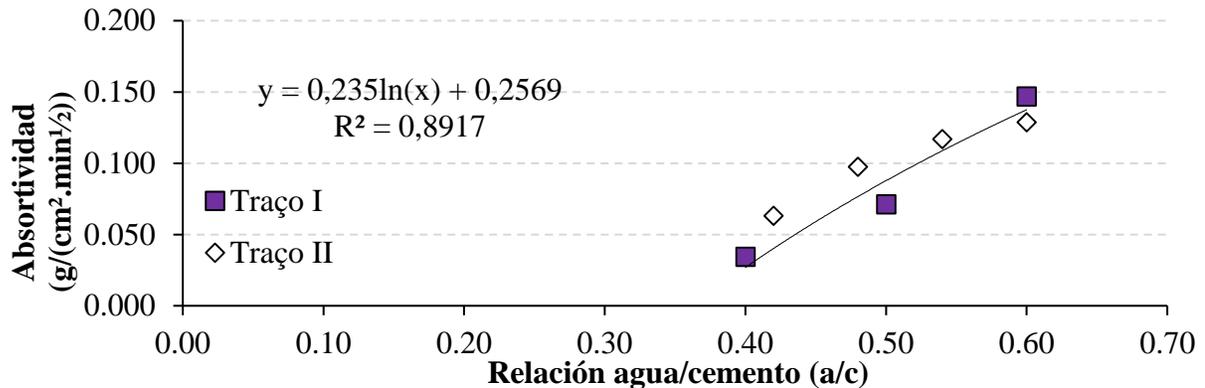


Figura 7. Variación de la absorptividad con diferentes relaciones agua/cemento.

Como es mostrado en la Figura 7, mayores relaciones agua/cemento presentaron mayores valores de absorptividad. Eso ocurre, principalmente, debido al aumento de la porosidad. No obstante, comparando las dos dosis, se puede notar que la Dosis II (con mayores cantidades de puzolana) tuvo coeficientes de absorción por capilaridad mayores que el primero. Eso es observado visualmente en los puntos sobre la línea de tendencia, mostrada en la Figura 7.

La principal razón para mayores coeficientes en la Dosis II fue el refinamiento de los poros y la reducción de sus diámetros. En consecuencia, en asociación con la tensión superficial del agua, fuerzas capilares más fuertes estuvieron presentes y por tanto más agua fue absorbida (Mehta y Monteiro, 2006; Yildirim et.al., 2011; Medeiros et.al., 2017).

De la misma manera, Pinto et al. (2018) observaron el mismo comportamiento al analizar la influencia de la carbonatación en la absorción de agua por capilaridad. Según López y Castro (2010), Chen et al. (2014) y Leung et al. (2016), cuanto mayor la sustitución de cemento por puzolana, mejor la microestructura se desarrolla y, por lo tanto, menos porosa se hace.

Por otra parte, comparando los resultados de la relación agua/cemento igual a 0,60, se observa que el comportamiento de la absorptividad fue el opuesto, con la Dosis I (con menor contenido de puzolana) desarrollando coeficientes mayores. Eso también fue relatado por Olsson et al. (2013), y puede estar relacionado a la calidad de los poros. En ese caso, mayores contenidos de sustitución por puzolanas inducen a poros más tortuosos, como lo observado por Medeiros-Junior y Lima (2016). Así, a pesar de sus fuerzas capilares ser más fuertes, su absorción por los coeficientes de capilaridad es menor.

En resumen, el efecto de los diámetros reducidos de los poros capilares asociados a la tensión superficial del agua fue el principal responsable por el aumento de la absorción capilar en menores relaciones agua/cemento (absorptividad de la Dosis II > Dosis I). Por otro lado, para mayores relaciones agua/cemento, la calidad de los poros fue el principal factor que llevó a menores coeficientes de absorción de la Dosis II.

Además de eso, la absorción de agua por capilaridad fue correlacionada con otras propiedades del concreto. La Figura 8 muestra la absorción capilar luego de 72 horas y la correlación con la Resistividad eléctrica. La Figura 9 presenta el comportamiento de la absorción capilar versus la resistencia a compresión.

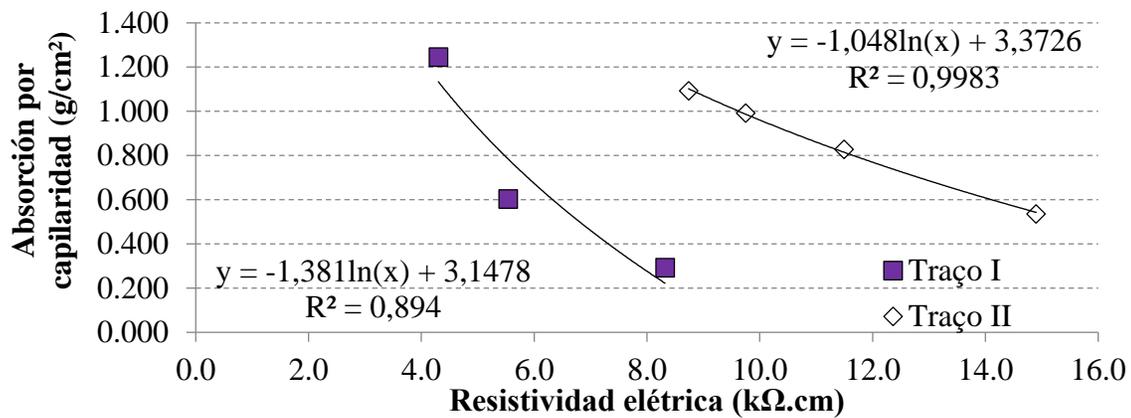


Figura 8. Correlação entre a Resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade.

De acordo com a Figura 8, a absorção de água por capilaridade diminui à medida que a Resistividade elétrica aumenta, para ambas as dosagens ensaiadas. De maneira semelhante, de acordo com a Figura 9, a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão são parâmetros inversamente relacionados. Também foram encontrados bons coeficientes R-ao-quadrado, o que reitera a dependência entre as duas variáveis.

Além disso, a Figura 10 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão versus a absorção por capilaridade. Ambas as medidas de absorção estão diretamente relacionadas e, de acordo com a Figura 10, uma alta dependência pode ser identificada entre elas, consolidando a influência de ambas as propriedades na absorção e percolação da água na microestrutura do concreto.

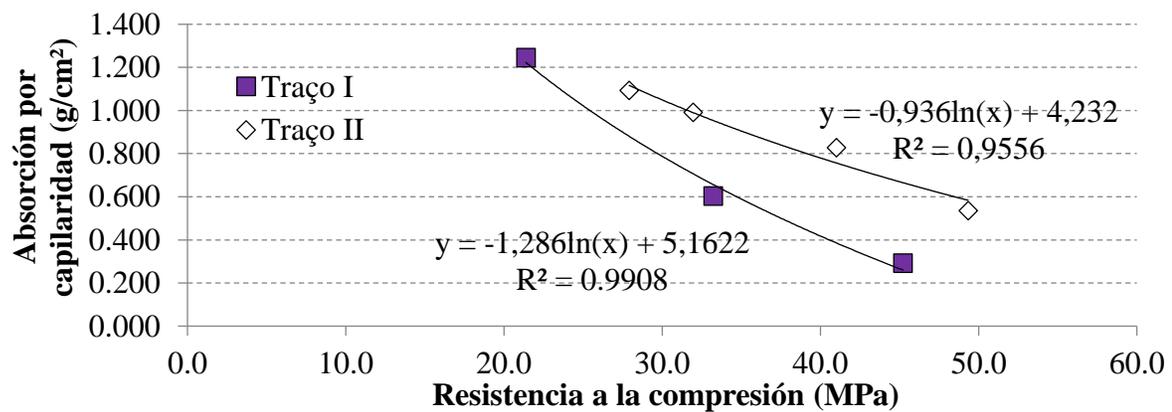


Figura 9. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade.

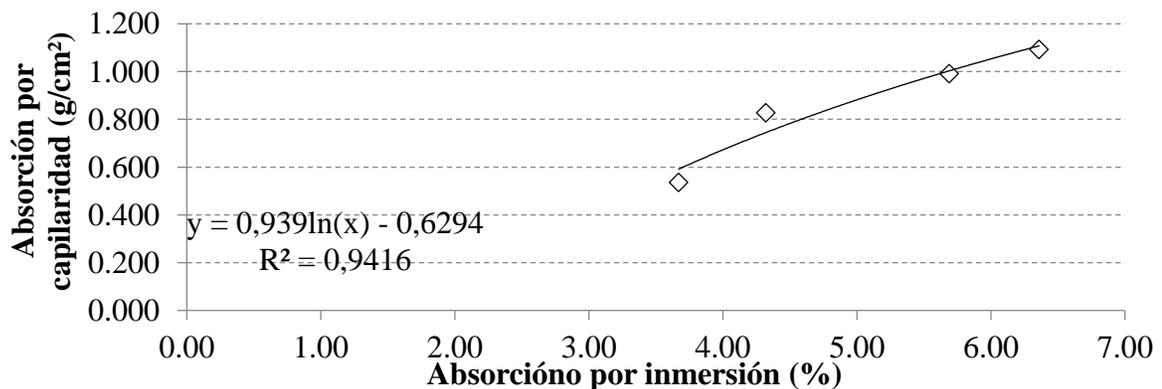


Figura 10. Correlação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Finalmente, la Tabla 5 resume todas las ecuaciones de tendencia logarítmica obtenidas con las correlaciones. De acuerdo con la Tabla 5, la mayoría de los coeficientes R-cuadrado encontrados fue mayor que 0,900. Eso es consecuencia de la dependencia entre todos los parámetros estudiados (Resistividad eléctrica, resistencia a la compresión, absorción de agua por inmersión y por capilaridad) y la porosidad del material, aun cuando esa correlación no sea exclusiva. No obstante, las ecuaciones en la Tabla 5, deben ser extrapoladas con mucha cautela, pues son válidas inicialmente apenas para los materiales y consideraciones adoptadas en esta investigación. Aun así, el estudio de la validación de esas ecuaciones, bien como otros materiales, es altamente confiable.

Tabla 5. Ecuaciones de correlación de los parámetros evaluados.

Parámetros	Ecuación	Dosis	R ²
Resistencia a compresión (f_c) e Resistividad eléctrica (p)	$f_c = 35,49\ln(p)-29,29$	I	0,983
	$f_c = 40,97\ln(p)-60,65$	II	0,987
Absorción por inmersión (A_i) e Resistividad eléctrica (p)	$A_i = -5,13\ln(p)+17,32$	II	0,935
Absorción por inmersión (A_i) e Resistencia a compresión (f_c)	$A_i = -4,83\ln(f_c)+22,41$	II	0,993
Absorción por capilaridad (A_c) e Resistividad eléctrica (p)	$A_c = -1,38\ln(p)+3,15$	I	0,895
	$A_c = -1,05\ln(p)+3,38$	II	0,998
Absorción por capilaridad (A_c) e Resistencia a compresión (f_c)	$A_c = -1,29\ln(f_c)+5,16$	I	0,991
	$A_c = -0,94\ln(f_c)+4,23$	II	0,956
Absorción por capilaridad (A_c) e Absorción por inmersión (A_i)	$A_c = 0,94\ln(A_i)-0,63$	II	0,942

4. CONCLUSIÓN

Las siguientes conclusiones fueron obtenidas con el desarrollo de este estudio:

- Existe una relación de dependencia entre la resistencia a la compresión y la Resistividad eléctrica, que fue comprobada por el coeficiente R-cuadrado encima de 0,98 para ambas dosis. Así, la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del concreto tienden a crecer juntas, al menos hasta la edad investigada en este artículo.
- La absorción de agua por inmersión fue inversamente proporcional a la resistencia a la compresión y la Resistividad eléctrica del concreto. Además de eso, la absorción por inmersión fue directamente proporcional a la relación agua/cemento.
- El mismo comportamiento puede ser observado en la absorción de agua por capilaridad. Coeficientes de correlación superiores a 0,89 fueron observados en ese caso.
- Concretos con mayor contenido de puzolana presentaron mayor Resistividad y absorción por capilaridad, para relaciones agua/cemento, menores que 0,60. Ese comportamiento es atribuido a la reducción de los diámetros de los poros y a la densificación de la microestructura. Sin embargo, concretos con menor contenido de puzolana presentaron mayor absorción por capilaridad para la relación agua/cemento de 0,60, debido a la menor tortuosidad de los poros.
- Quedó probado que la correlación entre los parámetros debe ser utilizada separadamente para cada tipo de cemento con diferentes contenidos de puzolana, una vez que las curvas de correlación fueron construidas para cada uno de los dos tipos de cemento utilizados en ese artículo. La única excepción fue la correlación entre la absorción y la relación agua/cemento, que permitió un ajuste entre las dos dosis como un único grupo (R-cuadrado = 0,89).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) de la Universidad Federal del Paraná (UFPR) por su apoyo a la infraestructura para el desarrollo de esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Benboudjema, F., Burlion, N., Capra, B., Carcasses, M., Colliat, J. B., Cussigh, F., Deby, F., Jacquemot, F., Larrard, T., Lataste, J. F., Bescop, P. L., Pierre, M., Poyet, S., Rougeau, P., Rougelot, T., Sellier, A., Yanez-Godoy, H. (2013), *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties*. Cement and Concrete Research. 45:21-36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.11.002>
- Andrade, C., D'andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*, Revista ALCONPAT, 1(2), 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Asociación Española de Normalización (2014). *UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*. Madrid.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 9778: Argamassa/concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Bem, D. H., Lima, D. P. B., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of chemical admixtures on concrete's electrical resistivity*. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 36(2):174-187. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2017-0058>
- Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high performance concretes*. Ingeniería de Construcción. 31(2):91-104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>
- Chen, C. T., Chang, J. J., Yeh, W. C. (2014), *The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete*. Construction and Building Materials. 71:35-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>
- Comité Euro-International du Béton. (1989). *CEB Bull 192: Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report*. Lausanne.
- Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. (2007), *Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes*. Cement and Concrete Composites. 29(2):136-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.005>
- Gans, P. S. (2017), *“Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à Compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e Secagem com cloretos e sulfatos”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Hoppe Filho, J., Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P., Isaia, G. C. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(3):411-418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596)

- Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review*. Cement and Concrete Composites. 39:60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M. P. (2016), *Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume*. Construction and Building Materials. 113:369-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071>
- López, M., Castro, J. T. (2010), *Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo*. Ingeniería de Construcción, 25(3):419-431. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300006>
- Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., Siqueira, H. C. (2012), *Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*. Cement and Concrete Composites. 34(3):392-399. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>
- Medeiros, M. H. F., Raisdorfer, J. W., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. A. (2017), *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2(4):1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G. (2016), *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. Construction and Building Materials. 107:11-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., Real, L. V. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, 4(2), 113-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2006), “Concrete – Microstructure, Properties and Materials”. McGraw Hill, New York City, United States, cap. 5, pp. 121-198.
- Olsson, N., Baroghel-Bouny, V., Nilsson, L. O., Thiery, M. (2013), *Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements*. Cement and Concrete Composites. 40:40-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001>
- Pinto, S. R., Macedo, A. L. A., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 3(3):1-10. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>
- Presuel-Moreno, F., Wu, Y. Y., Liu, Y. (2013), *Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time*. Construction and Building Materials. 48:874-882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.094>
- Ramezaniyanpour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F. (2011), *Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength*. Construction and Building Materials. 25(5):2472-2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- Sabbag, N., Uyanik, O. (2018), *Determination of the reinforced concrete strength by electrical resistivity depending on the curing conditions*. Journal of Applied Geophysics. 155:13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>
- Sengul, O. (2014), *Use of electrical resistivity as an indicator for durability*. Construction and Building Materials. 73:434-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011). “Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure” in: Freitas, V. P., Corvacho, H., Lacasse, M. (Eds.), XII International Conference on Durability of Building Materials and Components, FEUP Edições, Porto: Distrito de Porto (PT), 8 p.
- Wei, X., Xao, L. (2014), *Kinetics parameters of cement hydration by electrical resistivity measurement and calorimetry*. Advances in Cement Research. 26(4):187-193. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00034>

- Ye, H., Jin, N., Jin, X. (2017), *An Experimental Study on Relationship among Water Sorptivity, Pore Characteristics, and Salt Concentration in Concrete*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 61:530-540. <https://doi.org/10.3311/PPci.9621>
- Yildirim, H., Ilica, T., Sengul, O. (2011), *Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration*. Construction and Building Materials. 25(3):1282-1288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023>
- Yu, B., Liu, J., Chen, Z. (2017), *Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity*. Construction and Building Materials. 138:101-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100>
- Zhang, S. P., Zong, L. (2014), *Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials*. Advances in Materials Science and Engineering. 2014:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/650373>

Comportamiento electroquímico de uniones disimiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantequillado con Inconel 182 y sin enmantequillado

J. C. I. Ramirez –Soto^{1*} , J. T. Pérez-Quiroz² , J. M. Salgado-López³ , M. Martínez-Madrid² , T. Pérez-López¹ , M. Rendón-Belmonte² , E. Álvarez-Alfaro⁴ 

*Autor de Contacto: jcirs@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.334>

Recepción: 16/07/2018 | Aceptación: 04/03/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Pedro Garcés Terradillos

RESUMEN

Este trabajo evaluó el desempeño frente a la corrosión de uniones soldadas disimiles, utilizando como metales base acero al carbono ASTM A 615 y acero inoxidable austenítico AISI 304, y como metal de aporte electrodo ER-309L, se utilizó bisel simple a 45°. La mitad de los especímenes fueron sometidos a un proceso de “mantequillado” utilizando electrodo Inconel 182. Los resultados electroquímicos muestran que, a pesar de los defectos presentados en la unión soldada, estas tienden a pasivarse en medio alcalino, siendo las probetas con mantequillado las menos deterioradas por efecto de la corrosión y su resistencia mecánica no se ve minimizada.

Palabras clave: corrosión; soldadura disímil; infraestructura.

Citar como: Ramirez –Soto, J. C. I., Pérez-Quiroz, J. T., Salgado-López, J. M., Martínez-Madrid, M., Pérez-López, T., Rendón-Belmonte, M., Álvarez-Alfaro, E. (2019), “Comportamiento electroquímico de uniones disimiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantequillado con Inconel 182 y sin enmantequillado”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 167 – 184, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.334>

¹ Centro de Investigaciones en Corrosión, México.

² Instituto Mexicano del Transporte, México.

³ Tecnología de Materiales, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Electrochemical behavior of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 with and without buttering using Inconel 182

ABSTRACT

In this study, the corrosion performance of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 stainless steel with and without buttering using Inconel 182 was evaluated. In both cases, the filler metal was ER-309L and the base metals were prepared with a 45° single bevel. One half of the specimens were welded with “buttering” using Inconel 182. The electrochemical results showed that despite welding defects, the welded specimens formed a passive layer in alkaline environments. The specimens welded with buttering exhibited the best corrosion resistance and mechanical properties.

Keywords: corrosion; dissimilar welding; infrastructure

Estudo do comportamento eletroquímico da junta soldada em aço ASTM A 615 e aço inoxidável AISI 304 com manteiga de Inconel 182

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho contra a corrosão de juntas soldadas dissimilares, utilizando aço carbono ASTM A 615 e aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 como metais básicos, e como metal de enchimento eletrodo ER-309L, utilizando bisel único de 45 °. Metade dos corpos-de-prova foram submetidos a um processo de "manteiga" com eletrodo Inconel 182. Os resultados eletroquímicos mostram que, apesar dos defeitos apresentados na junta soldada, eles tendem a passar em meio alcalino, sendo os corpos de prova com manteiga menos deteriorado pelo efeito da corrosão.

Palavras-chave: corrosão; soldagem dissimilar; infra-estrutura.

1. INTRODUCCIÓN

El material de construcción más común es el concreto reforzado, cuyas propiedades mecánicas y químicas son muy importantes para la confiabilidad. Sin embargo, ha sido reportado en la literatura que el deterioro de las estructuras de concreto está asociado con la corrosión de las varillas (Pérez, 2009). La mayoría de los Puentes y Puertos en México han sido construidos usando concreto reforzado con varillas de acero al carbono. Como excepción está el muelle en Puerto Progreso, Yucatán, y algunas secciones del puerto de Coatzacoalcos, Veracruz. Donde el primero utiliza varillas de acero inoxidable como refuerzo y el segundo varillas galvanizadas, pero en ambos casos con resultados positivos. Esta información indica que la resistencia contra medios agresivos está limitada (especialmente en el caso de ambientes con iones cloruro y dióxido de carbono). Tradicionalmente se han utilizado diferentes tipos de métodos para contrarrestar el daño por corrosión en las estructuras de concreto. Basados en el mecanismo de protección, estos métodos pueden ser clasificados en cuatro categorías (Kepler, 2000):

- **Modificación de la matriz de Concreto**
Relación agua/ concreto; Adicionando materiales cementantes
- **Métodos Barrera**
Recubrimientos poliméricos; pinturas; recubrimientos metálicos
- **Métodos Electroquímicos**
Protección catódica por corriente impresa (ICCP) o ánodos galvánicos (CPGA);
Inhibidores de corrosión; extracción electroquímica de iones cloruro; realcanización electroquímica.

● **Rehabilitación de las estructuras de concreto con nuevos materiales.**

Materiales Compuestos, Acero inoxidable.

Las técnicas de rehabilitación y remodelación son muy diversas y algunas son aplicadas al acero, otras al concreto y otras en ambos materiales (González 2010). Debe tenerse en cuenta que la preservación de la infraestructura es vital tanto en términos económicos como sociales ya que esa provee seguridad y soporta el desarrollo social. No obstante, las estructuras de concreto se corroen y deben ser reparadas después de 10, 20, o 30 años de servicio por que las consecuencias de no hacerlo afectan no solo a la integridad de la estructura sino también la seguridad humana. Además, la corrosión reduce la funcionalidad y el valor de la estructura, requiriendo grandes costos financieros para reparar, remodelar o reemplazar las estructuras corroídas. Debido a estas razones existe la necesidad de desarrollar procesos para controlar y prevenir la corrosión en varillas de acero embebidas en concreto (Rougier, 2010; Llorca, 2008). De esta manera, las varillas de acero inoxidable representan una opción atractiva para incrementar la resistencia de las estructuras de concreto contra medios agresivos, la cual ha sido propuesta desde hace varios años (BSSA, 2003; Medina, 2013).

Investigadores tales como: Brown (1977), Treadaway (1989), Sorensen (1990), Nurnberger (1996) McDonald (1998), Pedferri (1997), Bertolini (1998), y Baltazar (2007) han llevado a cabo estudios para evaluar el comportamiento del acero inoxidable como material de refuerzo de estructuras de concreto. Por otro lado, (1982), Doddy, (1992), Ospina, (2007), García (2011), y Pérez-Quiroz (2016) han investigado la metalurgia y propiedades mecánicas de las uniones soldadas disimiles y sus resultados demostraron que la aplicación de este tipo de uniones soldadas es una opción viable para la remodelación de estructuras de concreto. Esto, considerando que el acero inoxidable es más caro que el acero al carbono, entonces las varillas de refuerzo pueden ser unidas por soldadura o conectores entre estos materiales para mejorar la resistencia a la corrosión de la estructura y con ello reducir costos.

Perez Quiroz (2016) ha indicado que es necesario evitar la difusión del carbono hacia el acero inoxidable y para minimizar el riesgo de daño por corrosión se debe utilizar el proceso de enmantequillado utilizando Inconel. De aquí es deseable el investigar la metalurgia de las uniones soldadas disimiles entre estos dos materiales. Al día de hoy, existe poca información sobre la evaluación del comportamiento a la corrosión de las unión soldadas entre acero al carbono y acero inoxidable utilizando enmantequillado con inconel o sin este proceso, Por ello, este trabajo evalúa la resistencia a la corrosión de uniones soldadas disimiles entre varillas de acero al carbono y de acero inoxidable tanto con enmantequillado utilizando Inconel 182 como sin este proceso; además se propone esta metodología para la remodelación de estructuras de concreto en puertos marinos (Figure 1).



Figura 1. Propuesta de reparación de estructuras de concreto reparadas usando acero inoxidable Pérez Quiroz, (2009).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Los materiales y proceso utilizados en este proyecto fueron seleccionados bajo dos criterios: costo de las uniones y facilidad de aplicación de soldadura en campo. La tabla 1 enlista los materiales, equipos, y reactivos químicos que fueron utilizados en este trabajo y la Tabla 2 provee las composiciones químicas de los materiales base, de los electrodos 309L, y del metal de aporte Inconel 182.

Tabla 1. Materiales, equipos, y soluciones químicas.

Materiales	Equipos	Soluciones químicas
Varillas de acero al carbono ASTM A615. Varillas de acero inoxidable AISI 304. Electrodos ER 309L Electrodos de Inconel 182	Sierra mecánica Cortadora automática de disco Torno convencional Fresadora convencional Máquina de soldar Castolin Eutectic, Master NT2000 AC/DC. Electroerosionadora Lijadora de disco Máquina de pulido de disco. Parilla Magnética. Multímetro Fluke Potenciostato Gamry interface1000. Electrodo de referencia Ag/AgCl	Solución al 3.5% en peso de Cloruro de sodio (NaCl) (agua de mar). Solución saturada de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)

Tabla 2. Composiciones químicas de los metales base, electrodo 309L y del metal de aporte Inconel.

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Fe
ASTM A 615	0.24	0.18	0.77	0.03	0.03	0.08	0.04	0.07	0.01	0.01	0.23	98.3
AISI 304	0.01	0.33	1.39	0.07	0.03	18.1	0.27	8.61	0.01	0.18	0.38	74.1
Elemento	C		Mg		Si		Cr		Ni		Fe	
Composición 309L (%)	0.03		1.92		0.80		23.8		13.3		Balance	
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Fe	Ti		
Composición Inconel (%)	<0.1	<1	5-9.5	<0.03	<0.015	13-17	>59	1-2.5	<10	<1		

La identificación de las muestras fue hecha como se indica en la tabla 3.

Table 3. Designaciones de muestras de ensayo.

Designación	Tipo de muestra
A.C. SW	Acero al carbono ASTM A615 en solución de NaCl 3.5% en peso
A.I. SW	Acero inoxidable AISI 304 en solución de NaCl 3.5 % en peso.
A.C. HC	Acero al carbono ASTM A615 en hidróxido de calcio.
A.I. HC	Acero inoxidable AISI 304 en hidróxido de calcio
Soldadura disímil BsAM1	Soldadura de bisel sencillo sin enmantequillado en solución de NaCl 3.5 % en peso.
Soldadura disímil BcAM2	Soldadura de bisel sencillo con enmantequillado en solución NaCl 3.5 % en peso.
Soldadura disímil BsHC1	Soldadura de bisel sencillo sin enmantequillado en hidróxido de calcio
Soldadura disímil BcHC2	Soldadura de bisel sencillo sin enmantequillado en hidróxido de calcio

Las muestras se fabricaron de varillas de acero al carbono y acero inoxidable con las siguientes dimensiones: 1.9 cm de diámetro y 10 cm de longitud (Figura 2). El bisel de la junta fue preparado a 45° siguiendo las normas NMX-H-121-1988 y ANSI/AWS D1.4-M 2005. El proceso de soldadura para las uniones fue soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW), este proceso fue seleccionado porque ser el de mayor aplicación en campo durante la soldadura de las varillas de refuerzo.

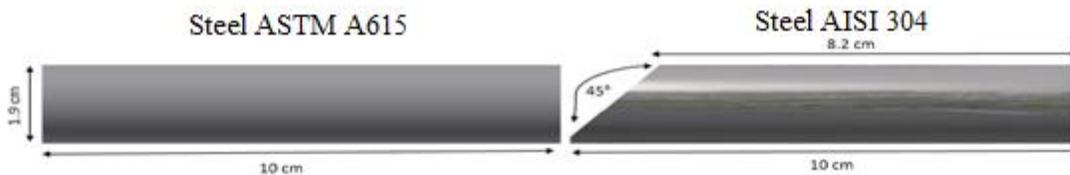


Figura 2. Diagrama la junta soldada con bisel sencillo a 45°. (tomada de Ramírez Soto y col., ALCONPAT, 2016).

El metal de aporte para las uniones soldadas fue acero inoxidable AISI 309L. En el caso del proceso de enmantequillado se utilizó electrodo de Inconel 182. Este paso consistió en aplicar una capa de 2 mm de espesor en la superficie frontal de la varilla de AISI 304. La máquina de soldar fue una Castolin Eutectic, Master NT2000 AC/DC y los parámetros de soldadura son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de soldadura.

Diámetro de la varilla (mm)	19
Diámetro del electrodo (mm)	3.2
Potencial Eléctrico (V)	22
Intensidad de corriente (A) DC-PI	90-95
Velocidad de soldadura (mm/min)	45
Calor de aporte (kJ/mm)	2.5

Después del proceso de soldadura, las muestras fueron longitudinal y transversalmente cortadas en una electroerosionadora ACTSPARK. Los cortes fueron montados en resina epóxica y entonces preparadas para metalografía siguiendo la norma ASTM E 3.

Antes de pulido el metal base de acero inoxidable de cada muestra fue barrenado en un extremo, para introducir un alambre de cobre y con ello lograr el contacto eléctrico necesario para las pruebas electroquímicas. El comportamiento a la corrosión de la unión soldada disímil fue evaluado utilizando un potenciostato Gamry Interface 1000 (Figura 3) aplicando las siguientes técnicas electroquímicas: medición del potencial de corrosión de acuerdo a ASTM C 876; resistencia a la polarización lineal de acuerdo a ASTM G 59, y medición del ruido electroquímico siguiendo ASTM G 199.

Resistencia a la polarización lineal (Rpl)

Esta técnica consiste en medir la relación entre el potencial y densidad de corriente en estado estable, y luego excitando al sistema por señales de corriente directa. Para el ensayo Rpl se usó un arreglo de tres electrodos: de referencia (Ag / AgCl), un electrodo auxiliar de grafito, y el electrodo de trabajo que era el espécimen soldado AC / SS. Los electrodos anteriormente mencionados fueron colocados en una celda y el ensayo Rpl fue realizado usando un potenciostato Gamry interface 1000 con los siguientes parámetros: velocidad de barrido de 10 mV/min y barrido de +/- 20 mV, de acuerdo con la norma ASTM G 59.

Ruido Electroquímico (EN)

El ruido electroquímico es una técnica que mide las fluctuaciones espontáneas del potencial y la corriente en sistemas electroquímicos, las cuales son de baja frecuencia (<10 Hz) y amplitud. El ruido electroquímico se origina, en parte, desde las variaciones naturales en cinética electroquímica durante el proceso de corrosión. Frecuentemente, EN es considerada y analizada como un fenómeno aleatorio (estocástico) acoplado a la cinética determinística.

La técnica EN fue realizada con ayuda de un potenciostato Gamry Interface 1000. Este equipo es capaz de medir en tiempo real el fenómeno de óxido-reducción que ocurre en los electrodos. El número de lecturas por muestra de ensayo fue de 2048, con un tiempo de estabilización de 10 segundos; el tiempo de ensayo fue de 45 min. Este ensayo requiere de tres electrodos, dos idénticos de la muestra, y uno de referencia de plata /cloruro de plata Ag / AgCl.

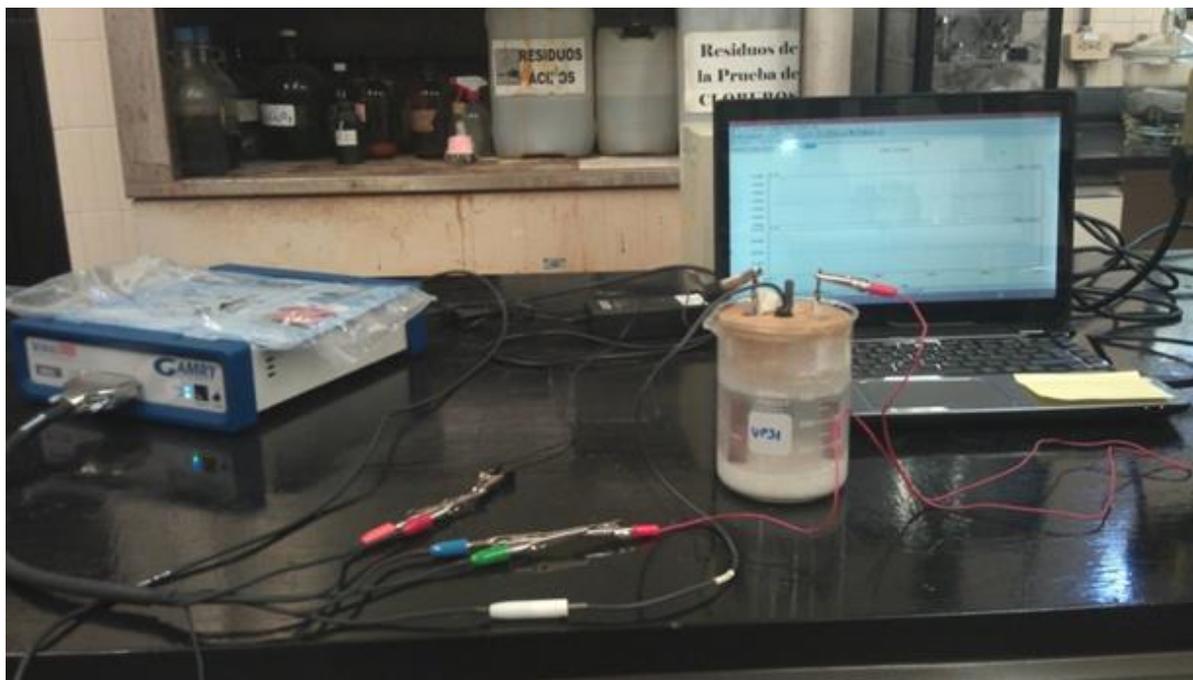


Figura 3. Celda electroquímica para ensayos de corrosión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Previo al ensayo electroquímico, las muestras fueron observadas usando un microscopio estereoscópico con lo que fue detectada la presencia de grietas en el enmantequillado (Figura 4); esas grietas (aproximadamente 2 mm de longitud) son asociadas con agrietamiento en caliente debido al contenido del níquel del Inconel 182. Debe tenerse en cuenta que el enmantequillado se utiliza en soldaduras disimiles para prevenir la difusión de carbono, la segregación de fases y la precipitación de carburos de cromo. Ya que estos fenómenos tienen gran influencia en el comportamiento frente a la corrosión del acero inoxidable. Los resultados coinciden con lo reportado por Evans (1962), quien reportó que las aleaciones de níquel soldadas con acero inoxidable son susceptibles al agrietamiento en caliente. Las macrografías de la Figura 4 muestran faltas de fusión cerca de la interfaz acero al carbono/metal de aporte/ enmantequillado. Tales defectos no influyen en el comportamiento a la corrosión de la unión soldada porque ellos están localizados en el interior de la unión soldada, pero si el electrolito entra en contacto con tales defectos ellos se comportarían como ánodos y tendría lugar un proceso de corrosión localizada. Por otro lado, estos tienen un efecto considerable en las propiedades mecánicas porque actúan como concentradores de esfuerzo.

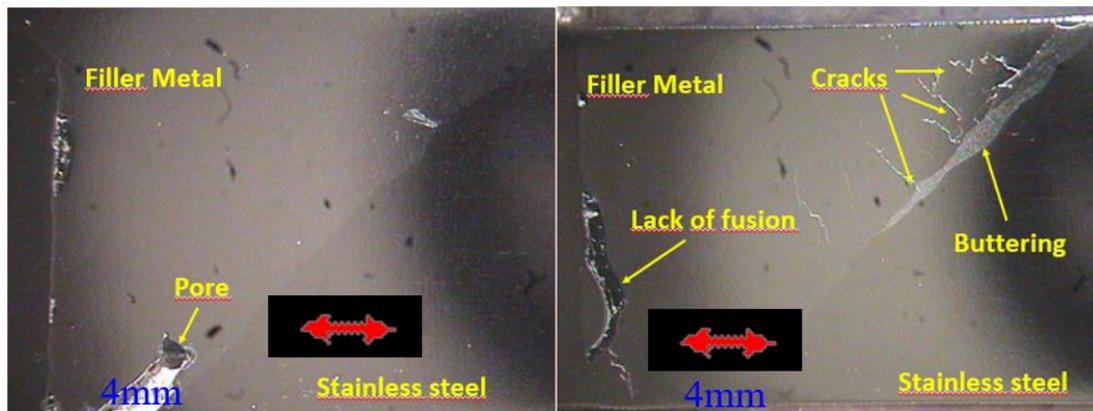


Figura 4. Muestras a 7x mostrando grietas y faltas de fusión en las uniones soldadas disimiles (tomada de Ramírez Soto y col., ALCONPAT, 2016).

3.1 Potencial de corrosión (E_{corr}).

La figura 5 muestra los resultados del potencial de corrosión de los metales base. Las mediciones fueron llevadas a cabo por 14 días durante los cuales las muestras estuvieron inmersas en cloruro de sodio (NaCl) e hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). Se puede observar en la Figura 5 que los valores más negativos son los del acero al carbono en solución salina (A.C.), la cual simula el agua de mar. Tales resultados indican una alta probabilidad de corrosión tal como está estipulado en ASTM C 876 (2015). Sistonen (2002) ha reportado que tales valores representan un riesgo severo de corrosión. En el caso del acero inoxidable (A.I.), los resultados del potencial de corrosión son más positivos que el caso del acero al carbono en la misma solución y de acuerdo con lo estipulado en ASTM C876 (2015). Estos caen dentro de la zona de incertidumbre, esto puede explicarse por la formación de la capa pasiva de cromita en la superficie del acero inoxidable, la cual hasta cierto punto lo protege. Sistonen (2002) ha sugerido que el potencial de corrosión debe ser interpretado con base de los criterios mostrados en la Tabla 5.

En el caso de la solución de Ca(OH)₂, Los resultados del potencial de corrosión para ambos materiales base son más positivos que en el caso de la solución de agua de mar, esto es por la alcalinidad de la solución de Ca(OH)₂ de acuerdo con lo mencionado en la norma ASTM C 876 (2015). Esta misma norma menciona que la probabilidad de daño del acero al carbono en tal

ambiente es mínima y basado en lo reportado por Sistonen (2002) ambos aceros están en una categoría de mediano riesgo de corrosión.

Tabla 5. Criterios para potenciales de corrosión de acero al carbono y acero inoxidable (Sistonen, 2002).

Condición de corrosión	Varilla de acero mV vs CSE	Varilla de acero inoxidable mV vs CSE
Riesgo bajo de corrosión alrededor de 10%	> - 200	> - 100
Riesgo medio de corrosión	- 200 a - 350	- 100 a -250
Riesgo alto de corrosión < 90%	- 350 a - 500	-250 a - 400
Riesgo severo de corrosión	< - 500	< - 400

La Figura 6 muestra la relación entre el potencial de corrosión y el tiempo para una unión soldada con bisel sencillo en solución salina al 3.5 % en peso de NaCl. Los valores caen dentro de la categoría de alta probabilidad de corrosión de acuerdo con la norma ASTM C 876 (2015), pero de acuerdo con la categoría de Sistonen (2002), estos caen en el intervalo de riesgo severo de corrosión. No debe pasar desapercibida la variación en el potencial de corrosión de la muestra BsAM2, esta fue causada por un error experimental, aunque la tendencia que siguen los valores es similar a la de otras muestras donde el riesgo de corrosión es alto.

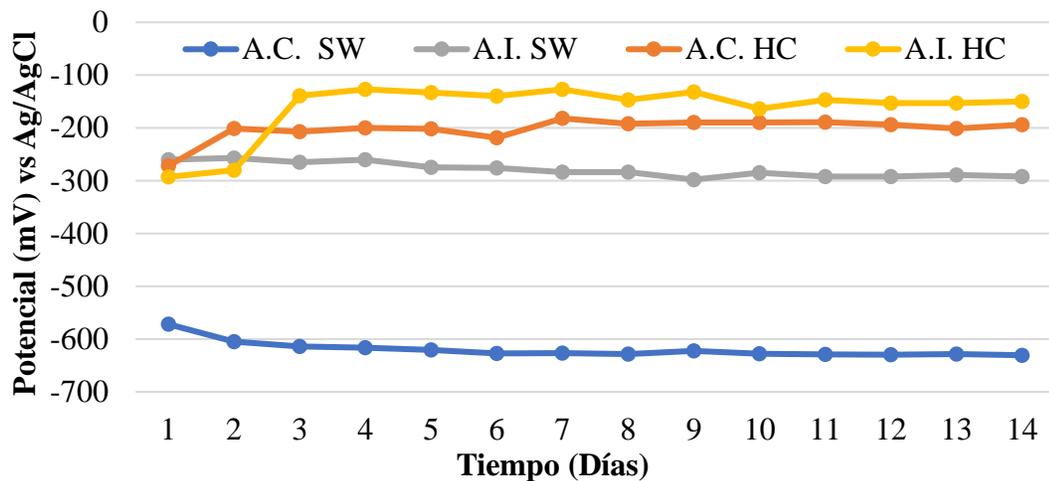


Figura 5. Potenciales de corrosión de los metales base en agua de mar e hidróxido de calcio.

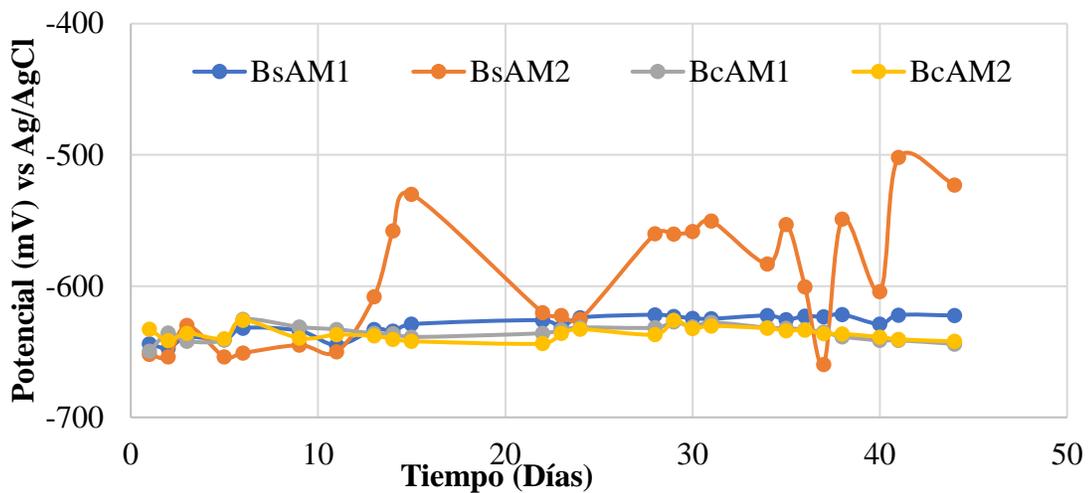


Figura 6. Potenciales de corrosión vs. tiempo en una unión soldada de bisel simple en agua de mar.

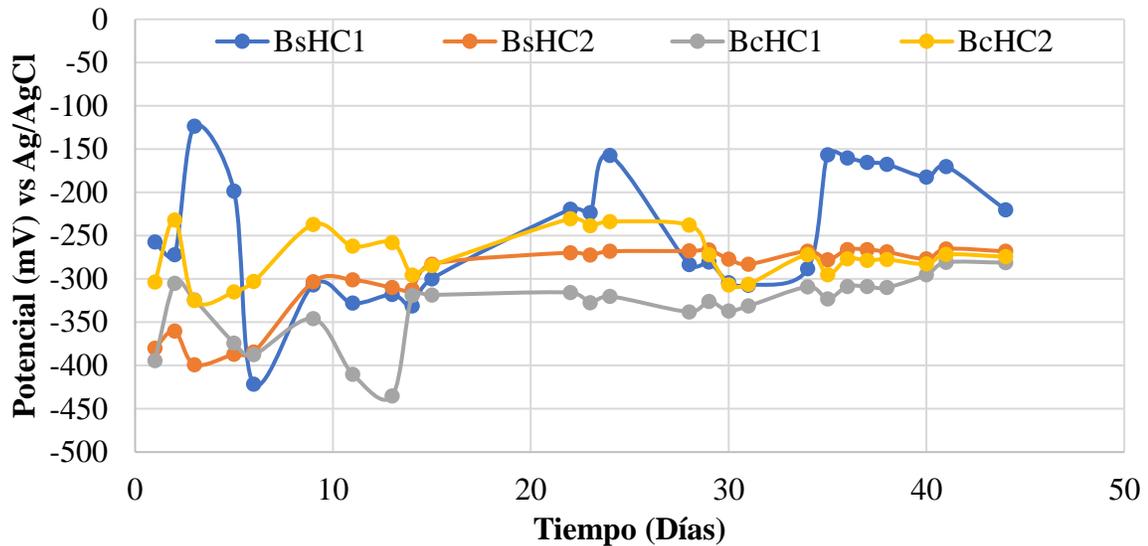
Comparando la Figura 5 con la Figura 6, es posible ver que no existe un efecto perceptible del proceso de enmantequillado en el potencial de corrosión. Sin embargo, tal comparación indica que el potencial de corrosión de la unión soldada completa cae a valores más negativos los cuales son similares a los del acero al carbono inmerso en agua de mar, lo cual indica una mayor susceptibilidad a la corrosión.

En lo que respecta a las muestras inmersas en las soluciones de cloruro de sodio (NaCl) e hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), la tendencia de los valores de potencial de corrosión con respecto al tiempo es entre -0.500 V a -0.670 V vs Ag/AgCl , esto debido a que el metal más activo es el acero al carbono (Figura 5) de acuerdo con ASTM G 82, ya que el potencial de corrosión del acero al carbono es aproximadamente -0.600 V contra el potencial del acero inoxidable que es de -0.300 V vs Ag/AgCl (Figura 5). Los valores de potencial mostrados en la Figura 6 respecto a lo indicado en ASTM C876 señala que existe un 90% de probabilidad de corrosión porque esos valores son más negativos que -0.350 V vs Ag/AgCl . La Figura 6 también muestra que el valor de potencial de corrosión está en el intervalo de entre -0.500 V a -0.650 V vs Ag/AgCl .

Las muestras con gran número de defectos (poros, grietas, etc.) fueron seleccionadas para ser ensayadas en la solución de hidróxido de sodio para investigar si se generaba la capa pasiva, la cual reduciría la velocidad de corrosión. La Figura 7 muestra los resultados que indican que después de 15 días, los valores están en el intervalo de probable corrosión de acuerdo con el estándar ASTM C 876 (2015) y a lo mencionado por Sistonen (2002). Sin embargo, después de 20 días los valores de potencial de corrosión se desplazan a valores más positivos. Estos resultados indicaron que el proceso de corrosión ocurrió durante los primeros 14 días, después de lo cual se formó en las muestras una capa pasiva adherente y compacta debido a la alcalinidad del ambiente; de acuerdo con la norma ASTM C 876 (2015) y lo reportado por Sistonen (2002). Así basado en estos criterios puede decirse que el daño por corrosión será mínimo en acero al carbono, acero inoxidable y en la unión soldada disímil.

Debe resaltarse que, para este ensayo, las muestras con gran número de defectos fueron seleccionadas (con y sin enmantequillado), de aquí que los resultados sugieren que las condiciones alcalinas minimizan el daño por corrosión en las varillas de refuerzo embebidas en concreto.

Figura 7. Potencial vs tiempo para la unión de bisel sencillo en hidróxido de calcio.



3.2 Medición de la velocidad de corrosión basadas en ensayos de resistencia a la polarización.

La Figura 8 muestra la velocidad de corrosión para las muestras inmersas en agua de mar, donde la velocidad de corrosión está entre 0.15 a 0.25 mm/año. Estos valores son 10 veces más altos que lo recomendado por DURAR (1997). Entonces la corrosión bajo estas condiciones es inevitable tanto para el metal base como para el metal de aporte. Como previamente fue mencionado la conexión eléctrica de la muestra BsAM2 se perdió por lo que los valores de esta muestra fueron cero.

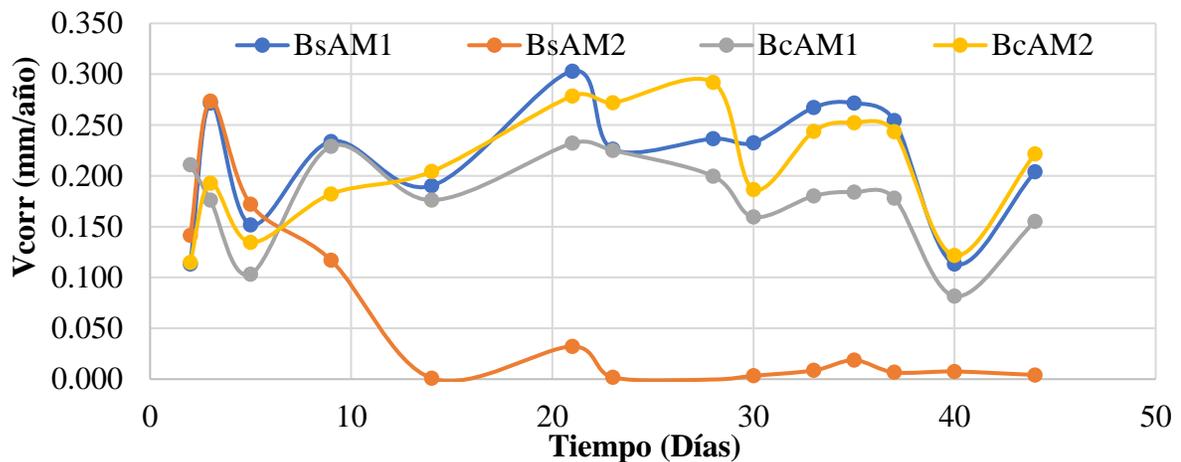


Figura 8. Velocidad de corrosión para la unión soldada de bisel sencillo en agua de mar.

La Figura 9 evidencia los cambios en la velocidad de corrosión de las muestras en la solución de hidróxido de calcio, los cuales son relacionados al inicio del proceso de corrosión y a la posible pasivación para las superficies de las muestras por el medio alcalino en el que las muestras fueron ensayadas.

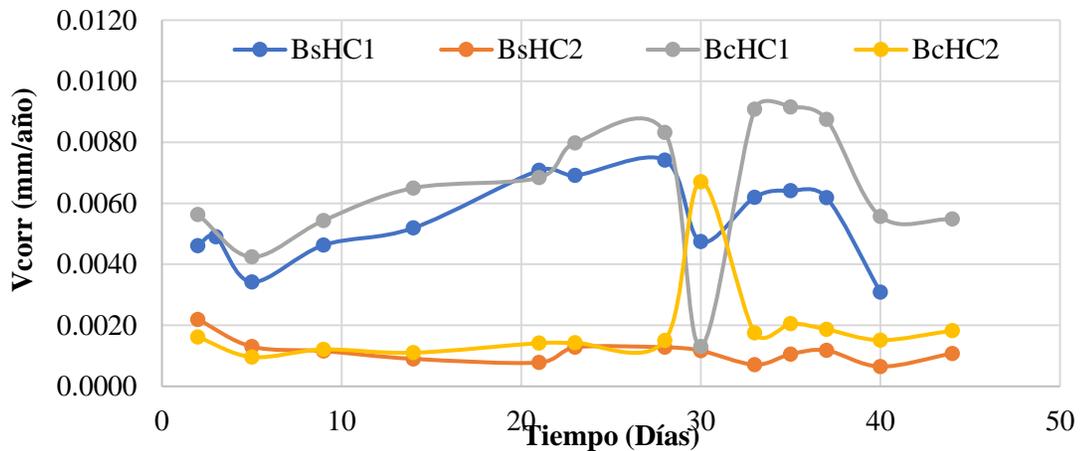


Figura 9. Velocidad de corrosión de la unión soldada de bisel sencillo en hidróxido de calcio.

La Figura 9 muestra la velocidad de corrosión de las uniones soldadas e inmersas en hidróxido de calcio, las cuales son varios órdenes de magnitud menores a las velocidades de corrosión en agua de mar (ver Figura 8). Como fue mencionado previamente esto es explicado por la formación de la capa pasiva debido al ambiente alcalino de la solución aun a pesar de los defectos de soldadura mostrados en la Figura 4. Estos hechos soportan el argumento de que el acero inoxidable es una buena opción para la sustitución parcial de varillas de acero al carbono embebidas en concreto tal y como se mostró en la Figura 1. Además, asumiendo que las varillas de acero inoxidable están embebidas en concreto nuevo, el material ya estaría pasivado y algún daño por corrosión severo no ocurriría rápidamente. Esta aseveración está justificada por el diagrama de Pourbaix del hierro (1966), el cual indica que en los intervalos alcalinos este está protegido por la pasivación de su superficie.

Investigadores como Medina (2012), Bastidas (2014), Velasco (2013), Sanchez (2013), Bautista (2013), Acosta (2013), Landmann (2013), Andrade (1993), y González (1984) han reportado buen desempeño del acero inoxidable aún en ambiente salinos, ya que las velocidades de corrosión para estructuras de concreto (100–125 $\mu\text{m}/\text{año}$) son más elevadas que los resultados obtenidos en este trabajo para acero inoxidable. La Figura 8 prueba que las velocidades de corrosión para las muestras son más altas que el intervalo recomendado, mientras que la Figura 9 indica velocidades de corrosión que son substancialmente más bajas que este intervalo. Entonces las reparaciones usando acero inoxidable están dentro de lo estipulado por la especificación en ambientes alcalinos.

3.3 Medición de la velocidad de corrosión por ruido electroquímico.

El efecto en el comportamiento a la corrosión en las uniones soldadas fue evaluado usando la técnica de ruido electroquímico. Esta técnica consiste en colocar dos electrodos idénticos en un electrolito descrito en el capítulo 2 de la norma ASTM C 199 y que se muestra en la Figura 3. Los resultados se muestran en las Figuras 10–13. Dos variables caracterizan el comportamiento a la corrosión de las muestras: la resistencia en ruido (R_n) la cual es equivalente a la resistencia a la polarización y la segunda variable es el índice de localización (I_L), que indica la forma de corrosión predominante de las muestras. En esta técnica aplica el siguiente criterio: corrosión uniforme (0.001 a 0.01), corrosión mixta (0.01 to 0.1), y finalmente corrosión localizada (0.1 to 1). Este criterio ha sido previamente considerado por Eden (1987), Kelly (1996), Mansfeld (1999), and Balán (2017).

La Figura 10 muestra que los valores de I_L de las muestras BsAM están en el intervalo de corrosión localizada, pero debe recordarse que esas muestras no tenían una capa de enmantequillado y fueron inmersas en agua de mar. Por esto es que se espera esa forma de corrosión. La Figura 11 muestra

que los productos de corrosión se localizan en puntos específicos de la superficie de la muestra cómo se describe en la norma ASTM G 199.

Aunque los valores de I_L para las muestras BcAM están en el intervalo de corrosión localizada, los productos de corrosión están uniformemente distribuidos en la superficie de las muestras, lo cual coincide más con corrosión mixta. Esto sugiere que el enmantequillado lleva a una corrosión más de tipo uniforme y menos agresiva. Lo cual es un consenso científico general que esta forma de corrosión es menos agresiva que las picaduras o la corrosión en hendiduras, ya que estas últimas causan daño estructural catastrófico.

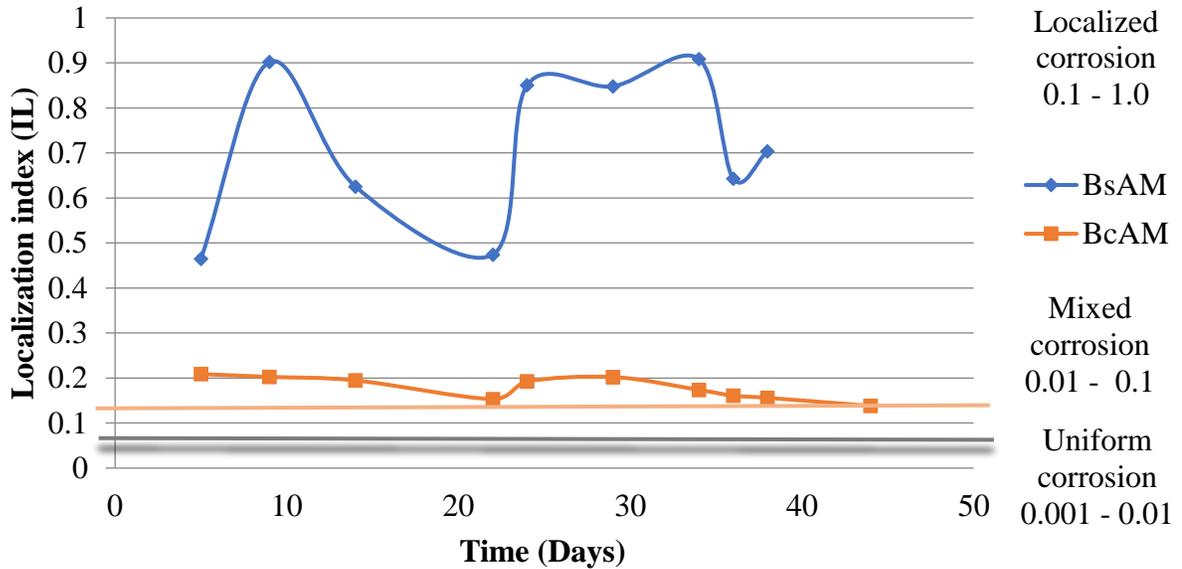
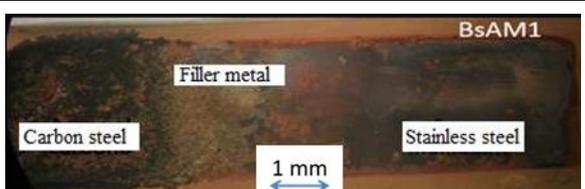
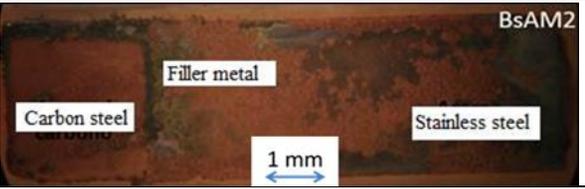
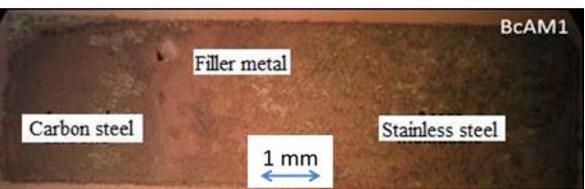


Figura 10. Resultados del ensayo de ruido electroquímico para las muestras BsAM y BcAM en agua de mar.

Muestra	Agua de mar , solución al 3.5w en peso de NaCl	
BsAM1		
BsAM2		
BcAM1		

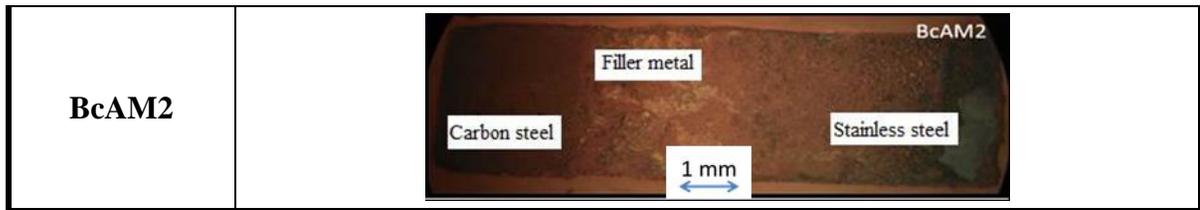


Figura 11. Imágenes de las muestras BsAM y BcAM ensayadas en agua de mar (solución de NaCl al 3.5% en peso).

La Figura 12 muestra los resultados de las muestras ensayadas en la solución de hidróxido de calcio, estos indican que ocurre corrosión localizada en los defectos de la unión soldada (como se observa en la Figura 13), este tipo de corrosión ocurre por la formación de celdas de aireación diferencial. La muestra BsHC, que no contiene defectos de soldadura exhibió una capa blanca en la superficie de la unión soldada (Figure 13), la cual inhibió la corrosión. Es claro Entonces que los lugares más susceptibles a la corrosión localizada son los defectos que presenta la unión soldada. En este caso, el comportamiento de las muestras BsCH está relacionado con la gráfica de la Figura 12. Estas muestras exhiben una tendencia la corrosión similar a la de las muestras BcCH, ya que los resultados de ambas están en el intervalo de corrosión localizada. Sin embargo, en el caso de BcHC se considera que la corrosión está asociada con los defectos de soldadura, así como a la disolución de la capa de níquel. Como ha sido explicado por Pourbaix (1966), el níquel se corroe ligeramente en soluciones alcalinas antes de formar una capa pasiva protectora. El comportamiento de BcHC corresponde con estas aseveraciones y aplica las diferencias en los resultados entre ambos tipos de muestras.

La Figura 13 presenta imágenes de las muestras ensayadas en hidróxido de calcio, las cuales están recubiertas de una capa de color blanco (depósitos calcáreos), la cual pasiva a las muestras.

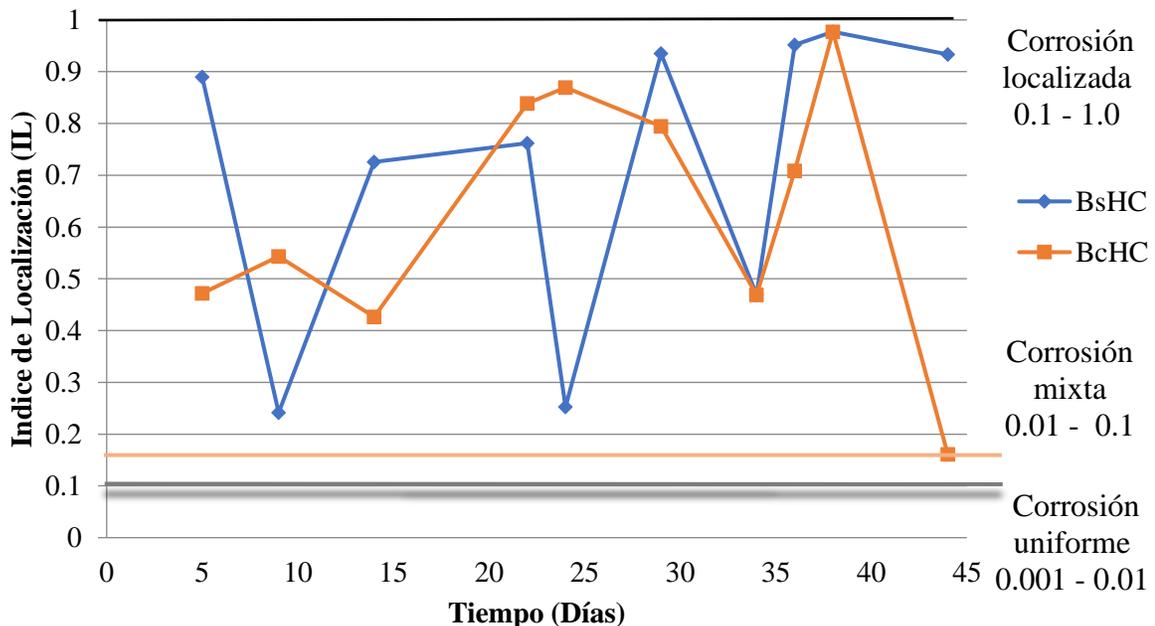


Figura 12. Gráfica de valores de I_L para las muestras de BsHC y BcHC ensayadas en hidróxido de calcio.

Nomenclatura	Solución de hidróxido de calcio
--------------	---------------------------------

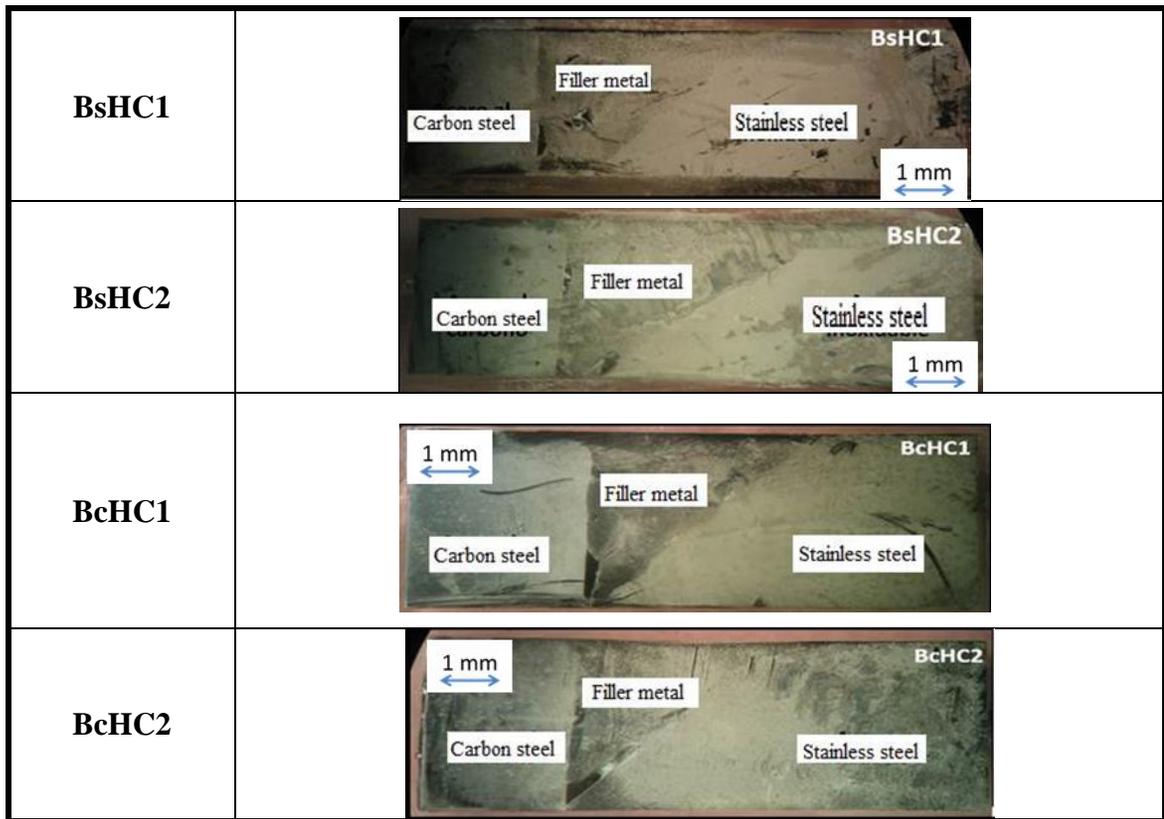


Figura 13. Superficies de las muestras BsHC and BcHC después de ensayo en solución de hidróxido de calcio.

La técnica de ruido electroquímico (R_n) es una herramienta poderosa para detectar bajas velocidades de corrosión de las muestras BsHC y BcHC inmersas en hidróxido de calcio, y es similar a la resistencia la polarización. Por ello, esta técnica es aplicada a las muestras y los resultados se muestran en las Figuras 14 y 15. De acuerdo con la norma ASTM G 102 (2015) la relación entre R_p e i_{corr} es inversamente proporcional. En otras palabras, a valores mayores de Resistencia al ruido electroquímico menor densidad de corriente indicando menor velocidad de corrosión. La muestra en agua de mar (solución de NaCl al 3.5% en peso) exhibió menores valores de ruido electroquímico que las muestras inmersas en $Ca(OH)_2$, de aquí que tengan una mayor densidad de corriente indicando una mayor velocidad de corrosión. Las Figuras 14 y 15 demuestran lo anterior. Los resultados coinciden con lo reportado por Kelly (1996) y Garcia (2014).

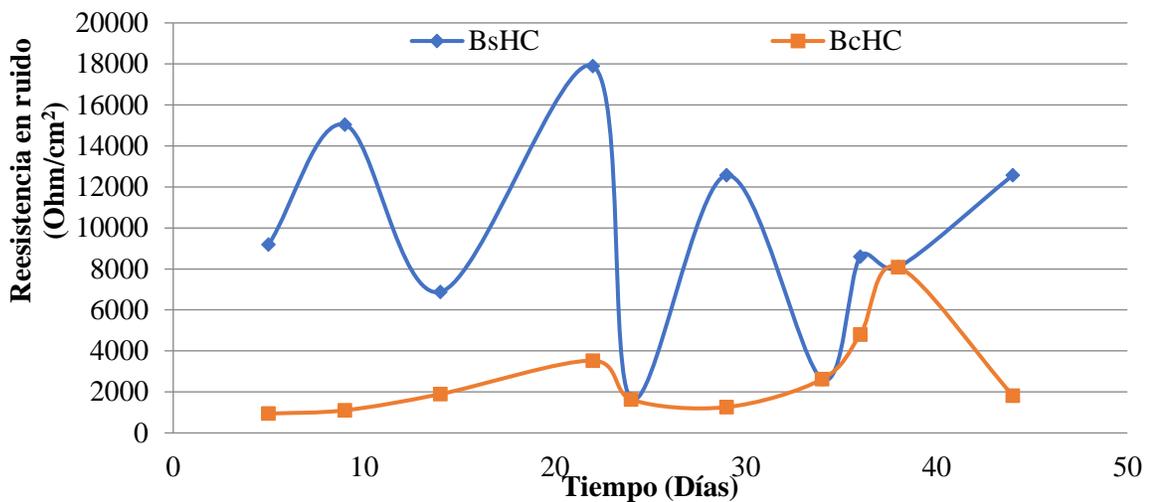


Figura 14. Resistencia al ruido electroquímico (Rn) de las muestras BsHC y BcHC ensayadas en solución salina.

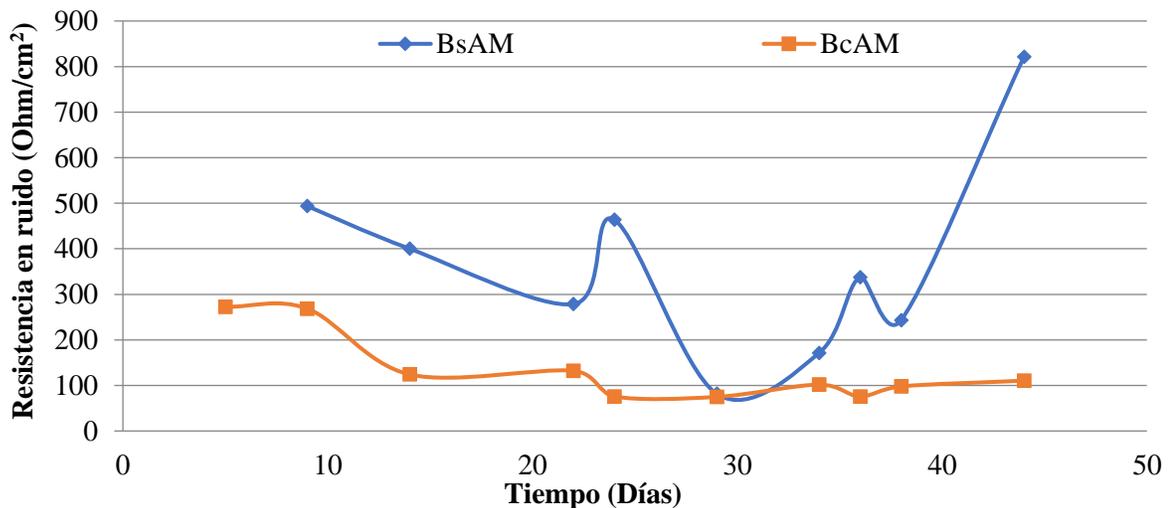


Figura 15. Valores de Rn para las muestras BsAM and BcAM ensayadas en hidróxido de calcio.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que la reparación de estructuras de concreto usando varillas de acero inoxidable es factible, particularmente si el acero está pasivo. La construcción o reparación de las estructuras de concreto deben ser llevadas a cabo siguiendo las normas aplicables para verificar que el área reparada se encuentra pasivada, para reducir corrosión futura.

Las mediciones de potencial de corrosión fueron útiles para determinar el comportamiento a la corrosión en dos diferentes ambientes para las varillas de acero al carbono y una unión soldada disímil entre dos materiales enmantequillada usando Inconel 182 y sin enmantequillado. Se encontró que el acero en agua de mar es susceptible a corroerse con 90% de probabilidad, mientras que el acero inoxidable está en el intervalo de incertidumbre. Sin embargo, resultados esencialmente opuestos fueron obtenidos para el ambiente en una solución alcalina (solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), donde la probabilidad de corrosión fue de 10%. Ambos tipos de uniones soldadas disímiles con y sin enmantequillado resultaron en un 90% de probabilidad de corrosión en agua de mar, mientras que en solución alcalina la probabilidad de corrosión par ambas uniones soldadas

decrecieron a 10%. Esto fue explicado por la capa pasiva encontrada en la superficie de las muestras.

La velocidad de corrosión de las uniones soldadas sin enmantequillado fue menor en la solución alcalina (solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) que en agua de mar (solución de NaCl 3.5% en peso). Estos resultados fueron explicados por la formación de la capa pasiva en la superficie de los defectos de las muestras en el ambiente alcalino.

Los resultados de ruido electroquímico fueron usados para describir el comportamiento electroquímico de las uniones soldadas con y sin enmantequillado inmersas en la solución alcalina y en el agua de mar. Estos indicaron que el tipo de corrosión de tal tipo de muestras era mezcla de corrosión y esto coincide con los resultados obtenidos por la técnica de resistencia a la polarización y las mediciones de potencial de corrosión.

5. REFERENCIAS

- Acosta, P., Matres, V., Pachón, A., Sánchez, J., Fullea, J., Picón, J. M. (2013). “*Armaduras de acero inoxidable expuestas en ambiente marino. Caracterización in-situ de la corrosión*”. DM Bastidas, E. Medina Sánchez, CEDINOX (Eds.), *Armaduras Acero Inoxidable*, CEDINOX, Madrid (España), 115-128.
- American National Standards - American Welding Society (2005) *ANSI/AWS D1.4-M Structural Welding Code - Reinforcing Steel*.
- ASTM International. (2014). *ASTM G59-97(2014) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>
- ASTM International. (2014). *ASTM G199-09(2014) Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0199-09R14>
- ASTM International. (2015). *ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0876-15>
- ASTM International. (2015). *ASTM G102-89(2015)e1 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0102-89R15E01>
- ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>
- Balán-Ortiz, C. A., Luna Brito, M., Pérez López, T.; Camacho-Chab, R.J. (2017) “*Análisis estadístico de los registros de ruido electroquímico obtenidos del proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto*”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2017, 16 (1). ISSN 1665-2738, Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62049878028>
- Baltazar, M., & Almeraya, F., Nieves, D., & Borunda, A., Maldonado, E., Ortiz, A. (2007). “*Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos*”. *Scientia Et Technica*, 13 (36), 353- 357. Disponible en: <https://www.redalyc.org/html/849/84903663/>
- Bastidas, D. M., Zapico, C. (2014). “*Comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable dúplex en solución simulada de poros de hormigón con elevado contenido de cloruros*”. *Industria química*, ISSN 2340-2113, N°. 17, 2014, págs. 68-74
- Bautista, A., Paredes, E. C., Velasco, F. (2013). “*Influencia del corrugado en la durabilidad de las barras austeníticas en medios sin carbonatar y con cloruros*”. *Armaduras de Acero Inoxidable*, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 105-114
- Bertolini, L., Gastaldi, M., Pastore, T., Pedefferri, M. P., Pedefferri, P. (1998). *Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete*. International

- Conference on “Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures”, Federal Highway Administration, Orlando. December 7–11.
- Brown, B. L., Harrop, D., Treadaway, K.W.J. (1976) “*Corrosion Testing of Steels for Reinforced Concrete Corrosion Testing and Monitoring*”, Reprint.
- British Stainless Steel Association (BSSA) (2003) “*The Use of Stainless Steel Reinforcement in Bridges*”, Special BSSA Report - April 2003, Disponible en: <https://www.bssa.org.uk/cms/File/REBar%20report.pdf>
- Doddy, T. (1992), “*Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service*”, Welding Journal, 71 (3), pp. 55-60.
- DURAR (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales Maracaibo, Venezuela, ISBN 980-296-541-3.
- Dirección General de Normas Mexicanas (1988). *NMX-H-121: Procedimiento de soldadura estructural acero de refuerzo*”.
- Eden, D. A., John, D. G., Dawson, J. L. (1987), *Corrosion monitoring. International Patent WO 87/07022*. World Intellectual Property Organization, 19.
- Evans, R. M. (1962). “*Joining of Nickel-Base Alloys*”, (No.181). DMIC Report 181, Battelle Memorial Institute, Columbus 1, Ohio
- García Fuentes, A., Centeno, L., Salas García, R., Velazquez Del Rosario, A. (2011). *Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A240–A537) y comportamiento mecánico ante cargas monótonica y cíclica*, Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales, 2012, 32(1). Recuperado de <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/113>
- García, I. L. (2014). “*Caracterización electroquímica del acero al carbono e inoxidable en soluciones concentradas con extracto de cemento*”; Tesis que para obtener el Grado de: Maestría en Ciencias de Materiales.
- González Díaz, F. (2010). “*Recalcinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*”. Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, J. A., Andrade, C., Escudero, M. L., (1984), “*Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón*”. Rev. Iberoamericana de corrosión y protección 15 (4), 11-19.
- Kelly, R. G; M. E. Inman, J. L. Hudson, (1996) “*Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions (STP 1277)*”, STP 1277 Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications (ASTM International), pp. 101-113 DOI: <https://doi.org/10.1520/STP37954S>
- Kepler, J. L., Darwin, D., Locke Jr, C. E. (2000). *Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures* (No. K-TRAN: KU-99-6.). Kansas Department of Transportation
- Landmann, M. S., Fuentes, J. R., Bonaste, V., & Martínez, A. S. (2013). “*Rehabilitación con armaduras de acero inoxidable*”. In *Armaduras de acero inoxidable* (pp. 167-190). ISBN 978-84-695-8183-4
- Lundin, C. D. (1982). *Dissimilar metal welds-transition joints literature review*. Welding Journal, 61(2), 58-63. URL: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1982_02_s58.pdf
- Mansfeld, F., Sun, Z. (1999), *Technical Note: Localization Index Obtained from Electrochemical Noise Analysis*. Corrosion Science, 55 (10) pp. 915-918 DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3283926>
- McDonald, D. B., Pfeifer, D. W., Sherman, M. R. (1998), *Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad, and solid metallic reinforcing bars in concrete*, Report No. FHWA-RD-98-153, Federal Highway Administration, McLean, VA, December, 137 pp. URL: <https://trid.trb.org/view/496237>

- Medina, E., Cobo, A., Bastidas, D. M. (2012). “Evaluación del comportamiento estructural y de resistencia a la corrosión de armaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 y dúplex AISI 2304 embebidas en morteros de cemento Pórtland”. *Revista de Metalurgia*, 48(6), 445-458. DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1203>
- Medina, E. D. B. (2013). “Introducción a las Armaduras de acero inoxidable”, 1-22. URL: <http://hdl.handle.net/10261/85075>
- Molina, F.J., Alonso, C., Andrade, C. (1993), “Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model”, *Materials and Structures* 26, 532. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472864>
- Nurnberger, U. (1996), “Stainless steel in concrete”. European Federation of Corrosion publications, No. 18. London, Institute of Materials.
- Ospina Lopez, R., Aguirre Corrales, H., Parra, H. (2007). “Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles”. *Scientia et Technica*, 13(34). Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934046>
- Pedefferri, P., Bertolini, L., Bolzoni, Pastore, F. T. (1997), “Behavior of Stainless Steels in Concrete,” *Proceedings of the International Seminar: The state of the art of the repair and rehabilitation of reinforced concrete structures* Eds. W.F. Silva-Araya, O.T. DE RINCÓN, and L. P. O’Neill, (Reston, VA: ASCE, 1997): p.192.
- Pérez, L.T. (2002). “Aplicación de la Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto”. Programa de Corrosión del Golfo de México.
- Pérez-Quiroz, J. T., Alonso-Guzmán, E. M., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Rendón Belmonte, M., Martínez-Madrid, M. (2014), “Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise”, *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 6734 – 6750.
- Pérez Quiroz, J. T. (2009), “Evaluación de acero inoxidable para la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado”. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química.
- Pourbaix, M. (1966), *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Pergamon Press, New York.
- Ramírez-Soto, J. C. I., Salgado-López, J. M., Pérez-Quiroz, J. T., Pérez-López, T., Terán-Guillén, J., & Martínez-Madrid, M. (2016). “Effect of buttering in mechanical properties of dissimilar metal weld joints for reinforcement bars in concrete structures”. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 248-261.
- Schierloh, M., Rougier, V., Souchetti, R. (2010). “Vigas de hormigón armado afectadas por corrosión y reparadas con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras (PRFS)”. IX Jornada “Técnicas de restauración y conservación del patrimonio”.
- Sánchez, E. M., Llorente, I., Fajardo, S., Bastidas, D. M. (2013), “Comportamiento frente a la corrosión por cloruros de una nueva armadura de acero inoxidable dúplex de bajo contenido en níquel”, *Armaduras de acero inoxidable*, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 91-103, Editores: CEDINOX, Centro para la investigación y desarrollo del acero inoxidable.
- Sistonen, E., Tukiainen, P., Peltola, S., Skriko, S., Lastala, M., Huovinen, S. (1998-2000), *Improving the durability of reinforced outdoor concrete structures by restricting cracks and protecting reinforcement*, part I & II. Project 1998–2002
- Soerensen, B., Jensen, P. B., Maahn, E. (1990), *The corrosion properties of stainless-steel reinforcement*. *Corrosion of Reinforcement in Concrete*. Ed. by C. L. Page, K. W. J. Treaday, P. B. Bamforth. Papers Presented at the Third International Symposium on "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", Belfry Hotel, Wishaw, Warwickshire, May 21-24, 1990
- Terradillos, P. G., Llorca, M. Á. C., Gómez, E. Z. (2008). “Corrosión de Armaduras en estructuras de Hormigón Armado”. Editorial Club Universitario. ISBN: 978-84-8454-685-6, Sapin.
- Treadaway, K. W. J., Cox, R. N., Brown, B. L. (1989), *Durability of corrosion resisting steels in concrete*. *Proceedings Institution Civil Engineers*, 86, pp.13–27.

Velasco Lopez, F. J., Alvarez Arboleda, S. M., Bautista Arija, M. A. (2013), *Comportamiento frente a la corrosión de corrugados dúplex de baja aleación en disoluciones simuladas de poros de hormigón*. In: Armaduras de acero inoxidable, pp. 81-90, ISBN: 978-84-695-8183-4

Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de Reacción Alkali-Agregado (RAA)

D. V. Ribeiro^{1*} , R. O. Rey¹ 

*Autor de Contacto: verasribeiro@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

Recepción: 19/06/2018 | Aceptación: 19/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la RAA de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador y el uso de adiciones minerales, a fin de mitigar esa reacción. Se utilizó el método acelerado de barras de mortero, preconizado por la NBR 15577-4: 2008. Los resultados indican que las arenas de la región metropolitana de Salvador presentan baja reactividad, sin embargo, las gravas presentaron alta reactividad y que adiciones minerales con características pozolánicas pueden mitigar la RAA. Este estudio, a pesar de limitarse a las condiciones utilizadas, es inédito en el Estado de Bahía y presenta un elevado índice de originalidad por utilizar contenidos de adiciones superiores a las convencionales. Se concluyó en este estudio que la microsíllica, si se utiliza en niveles muy elevados, puede, incluso, acelerar la reacción.

Palabras clave: RAA; agregados; adiciones minerales; mitigación.

Citar como: Ribeiro, D. V., Rey, R. O. (2019), "Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de RAA", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 185 – 199, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

¹ Universidade Federal da Bahia, Brasil.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Evaluation of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador regarding the occurrence of alkali-aggregate reactions (AAR)

ABSTRACT

In the present work the AAR of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador and the use of mineral additions in order to mitigate this reaction was evaluated. The accelerated test method using mortar bars, recommended by NBR 15577-4: 2008, was used. The results indicate that the sands of the metropolitan area of Salvador have low reactivity, however, the gravels presented high reactivity and that mineral additions with pozzolanic characteristics can mitigate the AAR. This study, although limited to the conditions used, is unprecedented in the State of Bahia and presents a high index of originality, since it uses higher contents of mineral additions than conventional use. It was concluded that microsilica, if used at very high contents, can even accelerate the AAR.

Keywords: AAR; aggregates; mineral additions; mitigation

Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Alcalis-Agregado (RAA)

RESUMO

O presente artigo avaliou a RAA dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador e o uso de adições minerais, a fim de mitigar essa reação. Empregou-se o método acelerado de barras de argamassa, preconizado pela NBR 15577-4: 2008. Os resultados indicam que os agregados miúdos da região metropolitana de Salvador apresentam baixa reatividade, entretanto, os agregados graúdos apresentaram elevada reatividade e que adições minerais com características pozolânicas podem mitigar a RAA. Este estudo, apesar de se limitar às condições utilizadas, é inédito no Estado da Bahia e apresenta elevado índice de originalidade por utilizar teores de adições superiores às convencionais. Concluiu-se neste estudo que a microsilica, se utilizada em teores muito elevados, pode, inclusive, acelerar a reação.

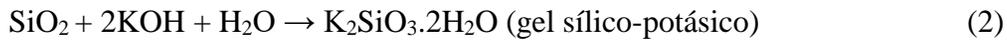
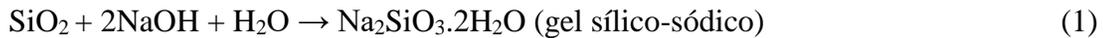
Palavras-chave: RAA; agregados; adições minerais; mitigação.

1. INTRODUCCIÓN

Las reacciones álcalis-agregado son reacciones químicas que ocurren entre ciertos componentes mineralógicos reactivos de los agregados y de los iones alcalinos e hidroxilos presentes en la solución intersticial de la pasta de cemento. Esta reacción tiene, como producto, un gel de carácter expansivo que, en presencia de agua, se expande, incrementando las fuerzas internas de la estructura, generando deformaciones y fisuras en la superficie del concreto, pudiendo tener un efecto altamente perjudicial, comprometiendo hasta la vida útil de la edificación (Thomas, 2011). Actualmente es considerada la existencia de tres tipos deletéreos de la reacción, en función de la composición mineralógica de los agregados y de los mecanismos involucrados. Siendo ellos: reacción álcalis-sílice, reacción álcalis-silicato y reacción álcalis-carbonato. En el presente trabajo a reacción álcalis-carbonato no fue tratada con mayor detalle por no ser el motivo de la pesquisa. El término reacción álcalis-agregado (RAA) cuando es mencionado en el texto, será referente a las reacciones álcalis-sílice o álcalis-silicato.

La primera fase de la reacción álcalis-sílice (RAS) es la reacción entre los iones hidroxilo (OH⁻) presente en la solución de los poros, y la sílice reactiva del agregado. Inicialmente los álcalis contribuyen en el aumento de la concentración de iones hidroxilo en la solución y seguidamente,

en la formación del gel expansivo (Thomas, 2011; Beyene et al., 2013). La RAS puede ser representada de forma simplificada por las ecuaciones (1) y (2) (West, 1996 *apud* Campos, 2015).



Para que ocurra la reacción álcalis-agregado son necesarias tres condiciones: i) presencia de fases reactivas en el agregado; ii) humedad suficiente y; iii) concentración de hidróxidos alcalinos en la solución de los poros del concreto suficiente para reaccionar con las fases reactivas de los agregados (Giordano, 2007).

Las materias primas utilizadas en la manufactura del cemento Portland son, generalmente, las responsables por la presencia de álcalis en el cemento, que varía en el rango de 0,2% a 1,5% de Na_2O equivalente ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$). Como consecuencia de la hidratación del cemento, se tiene una solución intersticial en el concreto que contiene esencialmente hidróxido de sodio, calcio y potasio. Normalmente, dependiendo de la cantidad de álcalis, el pH de la solución en los poros varía de 12,5 a 13,5. Este pH representa un líquido altamente alcalino en el cual algunas rocas ácidas (agregados compuestos de sílice y minerales silíceos) no permanecen estables (Giordano, 2007). Es decir, la presencia de álcalis influye en la reactividad del agregado y en la extensión de la reacción, una vez que cuantos más álcalis disponibles, mayor la concentración de OH^- en la solución de los poros y, en consecuencia, más sílice será disuelta (Beyene et al., 2013).

Es preciso estar atento para la ocurrencia de la reacción álcalis-agregado, ya que, una vez formado el gel expansivo, no habrá manera de revertir el proceso, apenas minimizar sus daños. Estudios recientes (Thomas, 2011; Beyene et al., 2013) demuestran que la expansión es reducida cuando un cemento puzolánico o adiciones minerales puzolánicas son utilizados y por ello es indicada la utilización de adiciones minerales puzolánicas, tales como la sílice activa y metacaolín, en la mezcla del concreto. Estos estudios evalúan los efectos de adiciones minerales sobre la reacción álcalis-agregado y observan que la utilización de una cantidad suficiente de adición mineral adecuada es una de las medidas más eficientes para la prevención de la RAA, controlando la expansión cuando un agregado perjudicialmente reactivo es usado en concreto (Thomas, 2011).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

En este trabajo fue utilizado el cemento patrón previsto por la Asociación Brasileira de Cemento Portland (ABCP), conteniendo elevadas concentraciones de álcalis he indicado para ensayos acelerados de evaluación de la RAA y del cemento Portland CP V ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, high sulfate resistance, de acuerdo con la ASTM C150), constituido esencialmente por clínquer y sulfato de calcio, comprobadamente no mitigador de la reacción álcalis-agregado, debido a la ausencia de puzolanas, permitiendo evaluar adecuadamente el efecto de la presencia de las adiciones utilizadas (metacaolín y sílice activa).

La arena usada para el vaciado de las probetas para el análisis de la reactividad y análisis de desempeños de los morteros, oriundos de la ciudad de Camaçari, fue adquirida en centros comerciales de Salvador. El agregado grueso reactivo utilizado para los ensayos de expansión con el metacaolín y la sílice activa fue provisto por una arenera de Salvador.

Se usó agua desionizada para el vaciado de las probetas de los ensayos de expansión de la RAA y agua proveniente de la red pública de abastecimiento, para el vaciado de las probetas para el análisis de desempeño de los morteros. Fue utilizado, también, aditivo químico superplastificante a base de agua.

2.2. Métodos

2.2.1 Caracterización de los materiales

Los materiales fueron caracterizados en cuanto a peso específico, utilizando la NBR 9776 (“Agregados – Determinación del peso específico de agregados finos por medio del frasco Chapman”) para la arena y la técnica de picnometría a gas helio (AccuPyc II 1340 Micromeritics) para metacaolín, la sílice activa y el cemento CPV ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, de acuerdo con la ASTM C150).

El área superficial del metacaolín y de la sílice fue determinada por el método BET la Contenidoia de Adsorción Multimolecular, y la del cemento fue determinada por el método de Blaine de acuerdo con la norma ABNT NBR NM 76 (ABNT, 1998).

2.2.2 Vaciado de los morteros

Para la confección de las probetas fueron utilizados en la caracterización de los morteros, se usó la proporción 1: 3 (cemento: arena) con relación agua/aglomerante de 0,6, en peso, con la presencia de adiciones minerales y aditivo superplastificante en diversas concentraciones, según la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de material necesario para la producción de 1m³ de mortero con sílice activa o metacaolín.

Contenido	Cemento (kg)	Arena (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)	Sílice Activa o Metacaolín (kg)	Relación agua/aglomerante	Relación agua/cemento
REF	485,45	1456,35	291,27	1,37	0,00	0,60	0,60
10%	436,90	1456,35	291,27	3,55	48,55	0,60	0,67
15%	412,63	1456,35	291,27	7,10	72,82	0,60	0,71
20%	388,36	1456,35	291,27	14,20	97,09	0,60	0,75

A fin de relacionar las propiedades físicas de los morteros con su comportamiento en relación con la reacción álcalis-agregado y analizar la influencia de las adiciones activas en la preparación de las mismas, fueron realizados ensayos de análisis de desempeño de los morteros utilizados. El estudio experimental involucró ensayos de resistencia (ABNT, 2005), capilaridad y densidad aparente por medio del Principio de Arquímedes, para análisis de desempeño de los morteros cuando es utilizada la adición activa. Para ello fueron vaciados 4 probetas (por edad) para cada determinación.

Para estudios de RAA, fueron hechos ensayos acelerados de expansión de barras de mortero, prescritos por la norma NBR 15577/2008 Partes 4 y 5 (ABNT 2004a; ABNT 2004b), para la verificación de la reactividad de los agregados en cuanto a la reacción álcali-agregado y a la capacidad de mitigación de las adiciones minerales para ese tipo de reacción.

2.2.3 Análisis de desempeño de los morteros

a) Resistencia Mecánica

Para el análisis de desempeño en cuanto a la resistencia mecánica, fueron hechos ensayos de resistencia a la compresión axial y tracción por flexión, con probetas de edades de 3, 7 y 28 días, según NBR 13279 (ABNT, 2005).

El límite de la resistencia a la compresión axial (R_c) está dado por la razón entre la carga máxima (P) soportada por la probeta y el área da su sección original (A), según la ecuación (3).

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

La resistencia a tracción por flexión (R_{TF}) es determinada por medio de la ecuación (4).

$$R_{TF} = \frac{PL}{B.D^2} \quad (4)$$

Donde P = carga máxima aplicada, en N; L= distancia entre bases de soporte, en mm; B = ancho de la probeta en la sección de ruptura, en mm; D = altura de la probeta, en la sección de ruptura, en mm.

b) Porosidad y Densidad aparente

Sobre la base de los principios de Arquímedes, es posible hacer la verificación de la porosidad y densidades aparentes de las composiciones utilizadas. La técnica consiste en comparar los pesos de las probetas antes y después de la inmersión en agua. Las muestras fueron pesadas aún secas (M_s) y enseguida, inmersas en agua, donde son dejadas durante 24 horas para que haya saturación de estas. Luego de ese período, se determina el peso inmerso (M_i) y el peso húmedo (M_u), entonces, calculamos la porosidad aparente (P_a) y la densidad aparente (D_a), utilizando las ecuaciones (5) e (6).

$$\% P_a = 100 \cdot \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \quad (5)$$

$$D_a = \rho \cdot \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del líquido (para el agua, ρ es igual a 1,0 g/cm³)

c) Absorción de agua por Capilaridad

La absorción excesiva de agua es un indicador de una mayor difusión de elementos y soluciones dentro de la mezcla, aumentando las oportunidades de ocurrencia de corrosión y también, de la reacción álcalis-agregado, siendo, así, fundamental para el presente estudio.

El ensayo de absorción de agua por capilaridad es realizado con tres probetas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada composición, a la edad de 28 días. Inicialmente esas probetas son secadas en la estufa por 24 horas y enseguida, enfriados a temperatura ambiente. Se determina el peso de las probetas secas y entonces, se coloca sobre una lámina de agua a nivel constante e igual a 7±1 mm de la base de la probeta. Durante el ensayo, se determina el peso de las probetas con intervalos de tiempo normalizados por la NBR 9779 (ABNT, 2012). Así, se calcula el coeficiente angular de la recta de absorción capilar (peso de agua absorbida por metro cuadrado de mortero) en función de la raíz cuadrada del tiempo, que representa el coeficiente de absorción capilar.

2.2.4 Determinación de la Reactividad álcalis-agregado (RAA)

El método utilizado para evaluar la reactividad de los agregados de la región metropolitana de Salvador en cuanto a la reacción álcali-agregado fue el definido por la norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a). Ese método consiste en evaluar la expansión dimensional de barras de mortero sometidas a una solución alcalina de hidróxido de sodio, a 80°C.

Para la preparación del mortero el agregado grueso debe ser obtenido con un mínimo de piedra, de forma de producir un producto clasificado según la norma. Fueron vaciadas barras de dimensión 25 mm x 25 mm x 285 mm con proporciones en peso de cemento: agregado de 1: 2,25 con relación a/c fijada por la norma e igual a 0,47 y utilizando un cemento-patrón provisto por la ABCP, propio para la realización de ese tipo de ensayo y que atienda a los requisitos de la ABNT NBR 5732 (ABNT, 1991).

2.2.5 Evaluación de la eficiencia de las adiciones activas en mitigar la ocurrencia de la RAA

El método definido por la norma NBR 15577-5 (ABNT, 2008b), con el mismo principio del método de la ABNT NBR 15577- 4 (ABNT, 2008a) es indicado para evaluar la eficiencia de materiales puzolánicos en mitigar la expansión debido a la de la reacción álcalis-agregado.

En este método son realizadas mezclas sin adiciones y con adiciones. Fueron confeccionadas tres barras de mortero con dimensiones 25 mm x 25 mm x 285 mm. Se usó cemento Portland CPV ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, de acuerdo con la ASTM C150), comprobadamente no mitigador de la RAA y el agregado reactivo disponible de la región.

Las medidas de expansión son hechas de manera semejante a la NBR 15577-4 (ABNT, 2008a), y al final de los 30 días se hace el análisis comparativo de la expansión en las barras de mortero de referencia (sin adiciones) y de las barras de mortero con adición de metacaolín y sílice activa, en las concentraciones de 10%, 15% y 20%. De esa manera es posible concluir si el material contribuyó o no en la reducción de la expansión provocada por la RAA.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de los Materiales

La composición química del cemento y las características físicas de los materiales utilizados en el estudio se encuentran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Composición química del cemento, determinado por FRX.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Contenido de Álcalis		
					Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq} *
19,10	4,84	3,19	61,12	2,73	0,24	0,70	0,70

$$* \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$$

Tabla 3. Características Físicas de los materiales

Propiedades	CPV ARI RS	Metacaolín	Sílice	Arena
Peso específico (g/cm ³)	3,08	2,68	2,35	2,66
Área superficial específica BET (m ² /g)	0,33	16,85	9,78	-
Finura cedazo 75 µm (%)	2,39	-	-	-

3.2 Análisis de desempeño de los morteros

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados de resistencia a compresión y a tracción en la flexión, a las edades de 3, 7 y 28 días de curado de los morteros con sustitución parcial del cemento por la sílice activa y el metacaolín, respectivamente. La proporción usada fue 1:3, con relación agua/aglomerante (cemento + adición) igual a 0,6, conforme Tabla 1. Utilizo u-se, también, aditivo superplastificante a fin de garantizar trabajabilidad a la mezcla.

Se observa que en la medida en que se aumenta el contenido de sílice activo, hay un aumento en la resistencia mecánica del mortero, alcanzando valores de compresión axial de 35,2 MPa con 20% de sílice activa, mientras que el mortero de referencia presentó resistencia de 27,8 MPa (aumento

de 27%). Comportamiento semejante es el observado para los resultados de tracción en la flexión, por tanto, para concentraciones de sustitución inferiores a 20%, a los 28 días, las probetas presentaron resistencia cercana a las probetas con mortero de referencia.

El aumento de la resistencia también es observado con 15% de metacaolín (Figura 2), donde la compresión axial alcanza el valor de 32,5 MPa, mientras que el mortero de referencia presentó resistencia de 27,8 MPa (aumento de 17%). Aun cuando los morteros de 10% hayan mostrado resistencia inferior a las de referencia, los resultados se encuentran en rangos de error muy cercanas, concluyéndose por tanto que no hubo variación de resistencia considerable con la adición de 10% del material.

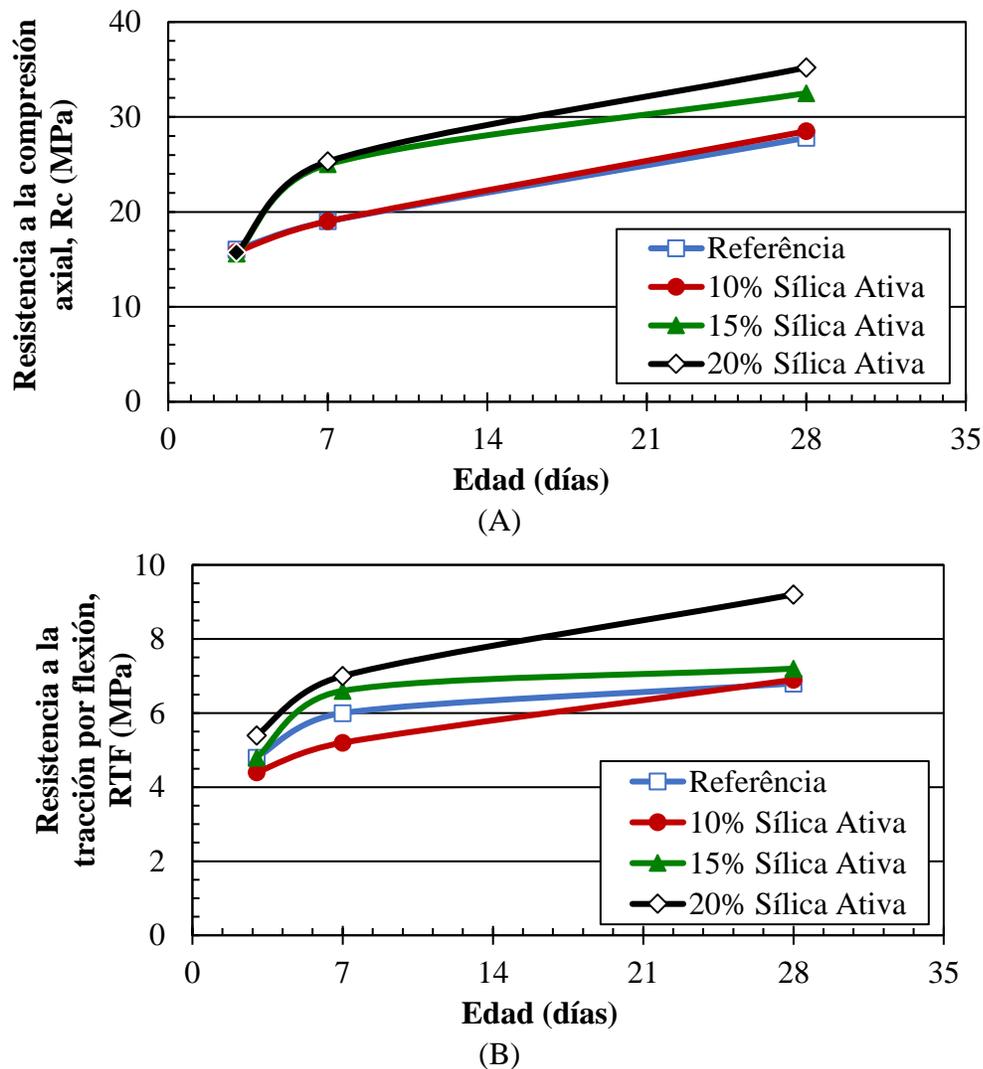


Figura 1. (A) Resistencia a la compresión axial y (B) a tracción por flexión de los morteros conteniendo sílice activa, en sustitución parcial al cemento Portland, en función de la edad.

En los resultados de tracción por flexión, también no se observó aumento significativo de la resistencia de los morteros con la adición. Este comportamiento fue observado por Beltrão (2010) al ensayar probetas de concreto con adición de metacaolín a concentraciones de 6%, 10% y 14%. Según Hassan et al. (2012) los resultados de resistencia a compresión a los 28 días muestran que la adición de cualquier contenido de metacaolín aumenta la resistencia a la compresión del concreto. Por tanto, no hay “linealidad” en la relación entre el contenido utilizado y el aumento de la resistencia, una vez que el concreto con 8% de metacaolín presentó resultados mejores que los

de 11%. Munhoz (2007) también observó un decrecimiento en la resistencia a la compresión cuando son comparados los resultados de las probetas con 5% y 10% de la adición activa, siendo el resultado de 10% el menor presentado, cuando es comparado con las concentraciones de 5% hasta 20%.

Además de eso se observó, una mejora de apenas 7% de la resistencia a la compresión, a partir de la adición de 8% de metacaolín, cuando es utilizado en concentraciones de hasta 25% (Munhoz, 2007). Es posible que haya ocurrido una “saturación del mortero”, esto es la cantidad de adición disponible, permaneció mucho mayor que la cantidad de hidróxido de calcio (producto de la hidratación del cemento). Con esa relación “desproporcional” la reacción puzolánica ocurrirá de manera más lenta, retardando la formación del CSH y resultando, así en un menor aumento de la resistencia con altas concentraciones de adición (Beltrão, 2010).

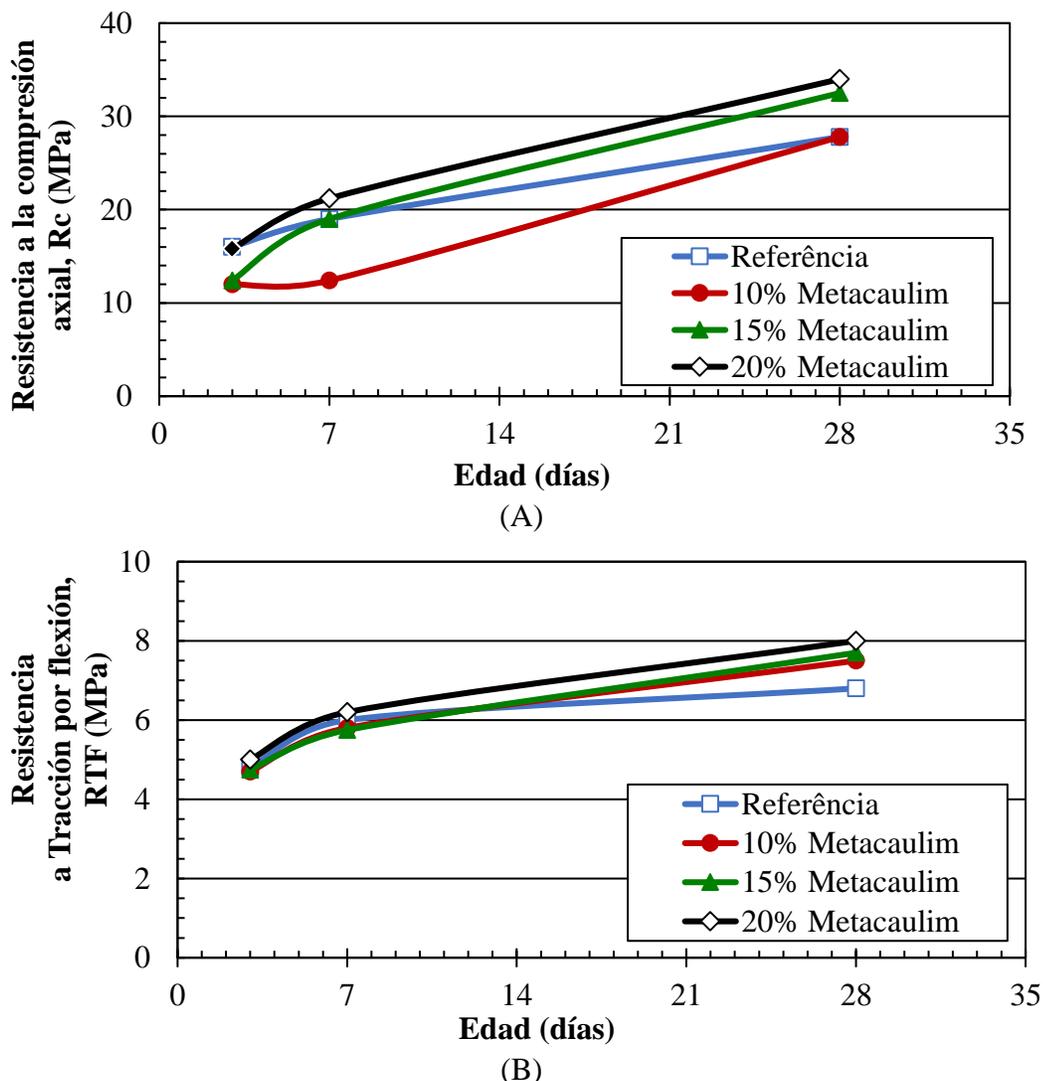


Figura 2. (A) Resistencia a la compresión axial y (B) a Tracción por flexión de los morteros conteniendo metacaolín, en sustitución parcial al cemento Portland, en función de la edad.

El aumento de la resistencia de los morteros con sílice activa y metacaolín ocurre porque la puzolana, juntamente con el hidróxido de calcio, genera compuestos ligantes, de características similares a los compuestos consecuentes de la hidratación directa de los grados de clínquer. Como consecuencia se tiene una estructura más compacta, química y mecánicamente más resistente que

la del cemento Portland común. Así, la presencia de cementos puzolánicos contribuye para una mayor compacidad y resistencia a la compresión luego de 28 días de curado y mayor impermeabilidad al agua (Giordano, 2007).

El uso de la sílice y del metacaolín permitió la obtención de un mortero menos permeable, conforme lo esperado y también observado en estudios de Gomez-Zamorano et al. (2015). A partir de los resultados de caracterización (tabla 3), se tiene que la sílice y el metacaolín son materiales más finos que el cemento, una vez que presentan mayor área superficial. Las partículas más finas de esas adiciones tienden a disminuir la cantidad relativa de poros capilares, actuando en una reducción de la absorción de agua por capilaridad, como lo observado en la Figura 3.

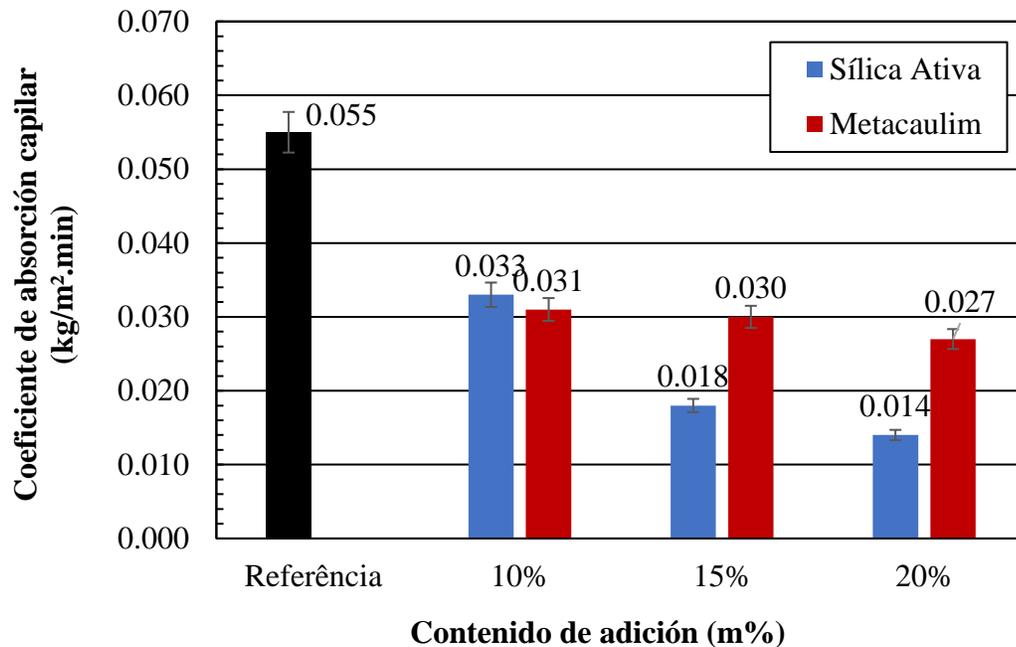


Figura 3. Coeficiente de absorción capilar de los morteros conteniendo sílice activa y metacaolín en sustitución parcial al cemento Portland, luego de 28 días de curado.

La Figura 4 presenta los resultados de densidad y porosidad aparentes para morteros de referencia (sin adición) y conteniendo sílice activa y metacaolín en sustitución parcial al cemento Portland. Se observa que no hay variación significativa en la densidad del mortero al ser sustituido parcialmente el cemento Portland por los materiales puzolánicos, entretanto, se observa un aumento significativo de la porosidad al utilizar sílice y una reducción en la porosidad al utilizar el metacaolín.

Una vez que el metacaolín y la sílice activa son materiales más finos que el cemento, se espera que haya taponado de los poros, además de su refinamiento y consecuentemente, la reducción de la porosidad

Los resultados analizados por Siddique (2011), indican que la utilización de sílice activa reduce la porosidad del concreto, diferente de lo que fue observado en este trabajo. Se cree que el uso del aditivo sin reducción parcial del agua haya influenciado en este comportamiento, ya que a pesar de la relación agua/aglomerante haberse mantenido constante, la relación a/c varió, conforme lo presentado en la tabla 1. Para mayores concentraciones de sílice, se tiene mayor relación a/c y consecuentemente, mayor cantidad de agua en la mezcla. El agua adicional, que no es consumida en la hidratación del cemento, permanece libre en el sistema y al evaporarse, da origen al aumento de la porosidad del mortero.

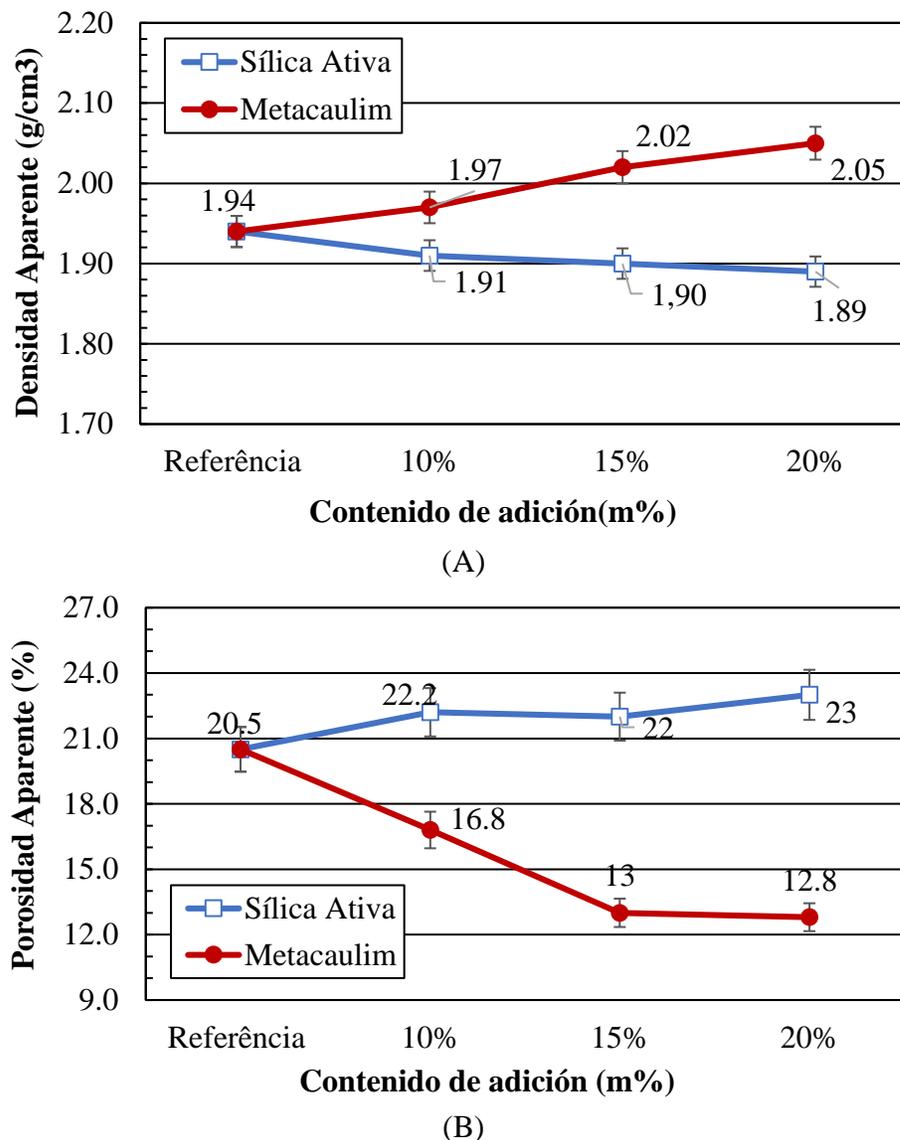


Figura 4. (A) Densidad y (B) porosidad aparente de los morteros conteniendo sílice activa y metacaolín, en sustitución parcial al cemento Portland, luego 28 días de curado.

3.3 Determinación de la reactividad de los agregados de la región metropolitana de Salvador

Fueron analizadas algunas arenas y piedras provenientes de depósitos localizados en la región metropolitana de Salvador (RMS) y en Feira de Santana. La Figura 5 presenta los resultados de expansión de las barras de mortero, sometidas al ensayo de RAA, en función del tiempo de ensayo, para diversos agregados gruesos. De acuerdo con la norma NBR 15577:2008, para ensayos de RAA para evaluación de agregados gruesos, estos deben ser triturados, con la finalidad de obtenerse una granulometría deseada y semejante a un agregado fino.

La Figura 6 presenta los resultados de expansión de las barras de mortero, sometidas al ensayo de RAA, en función del tiempo de ensayo, para agregados finos comercializados en la región metropolitana de Salvador (RMS) y en Feira de Santana.

Así, analizando los resultados obtenidos con los agregados utilizados, se observa que, de manera general, los agregados gruesos son reactivos cuanto la reactividad álcalis-agregado, en cuanto que los agregados finos son potencialmente inocuos. Siendo así, hay restricciones en cuanto a la utilización de las piedras en la RMS. Dependerá de las condiciones de humedad y del cemento seleccionado, será necesario utilizar adiciones activas en el concreto para mitigar la RAA.

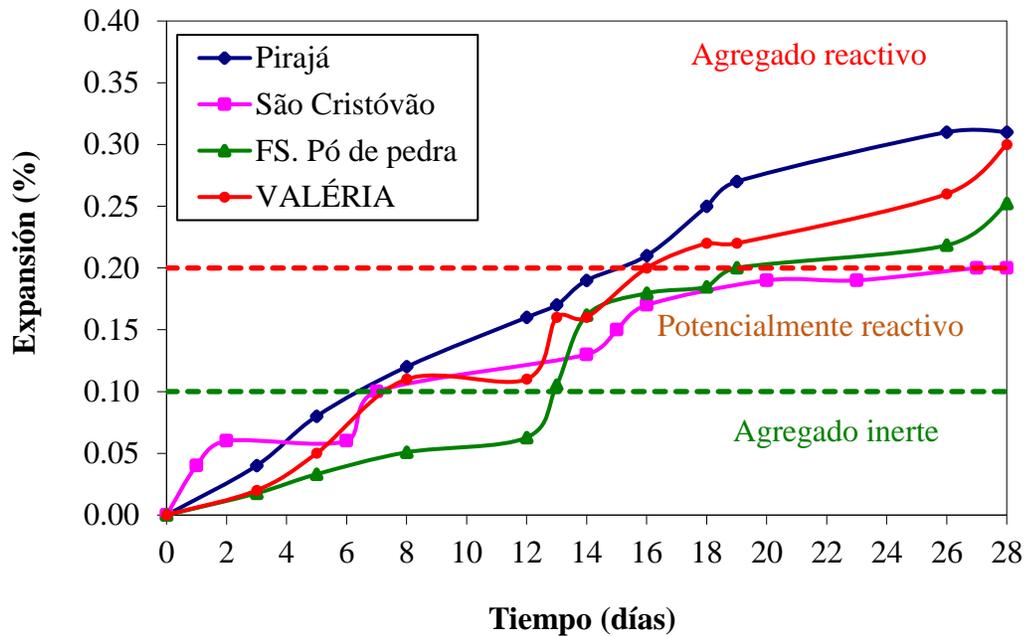


Figura 5. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo agregados gruesos comercializados en Salvador.

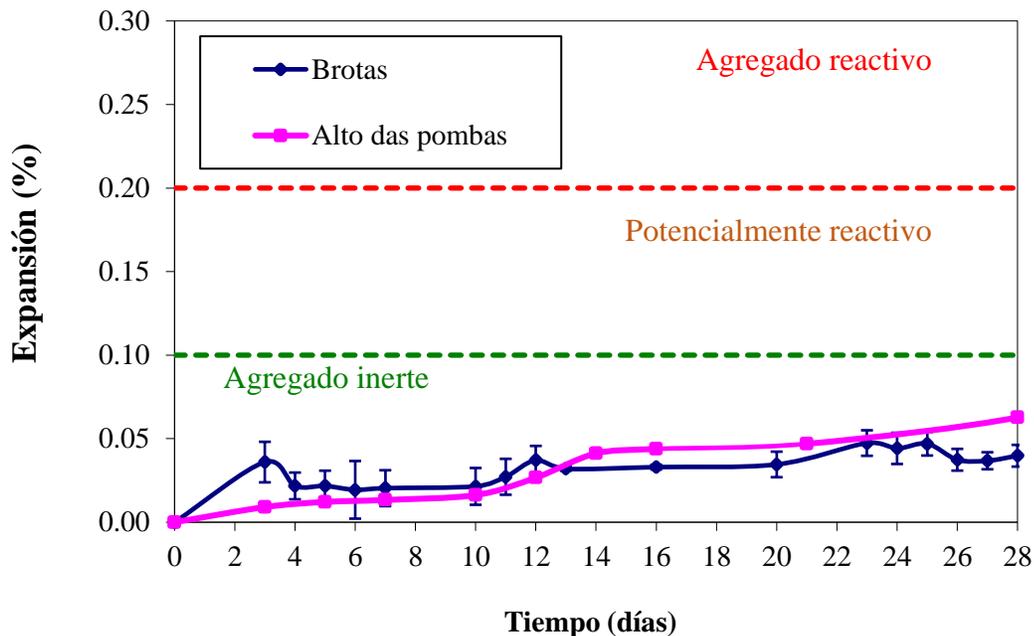


Figura 6. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo agregados finos comercializados en Salvador.

3.4 Evaluación de la eficiencia de las adiciones activas en mitigar la RAA

Los resultados de las investigaciones de las expansiones realizadas por el método acelerado, en la presencia de la sílice activo y metacaolín son presentados en las Figuras 7 y 8, respectivamente.

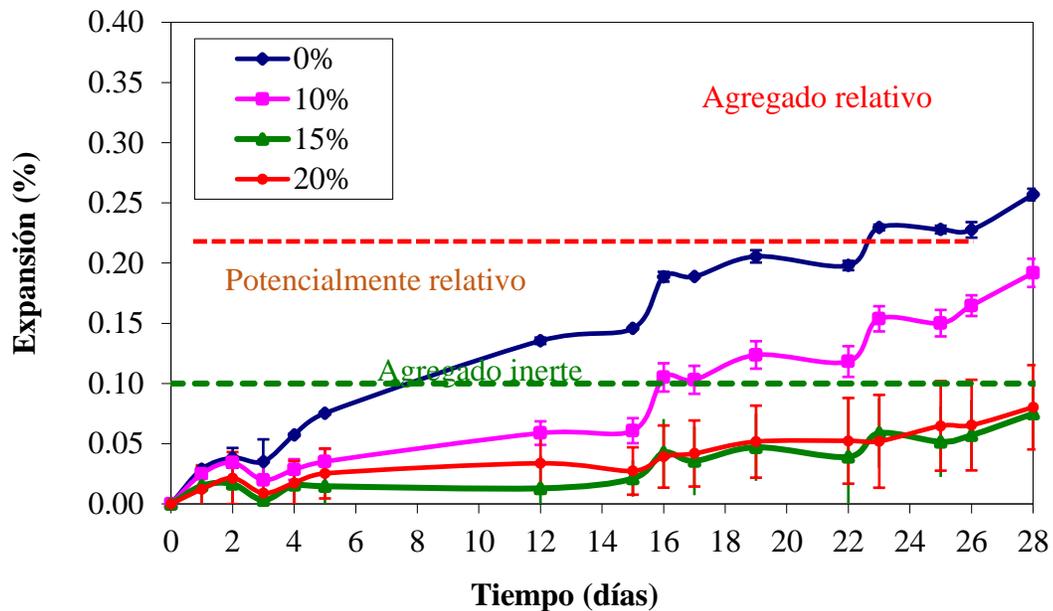


Figura 7. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo adición de 10%, 15% e 20% de sílice activa.

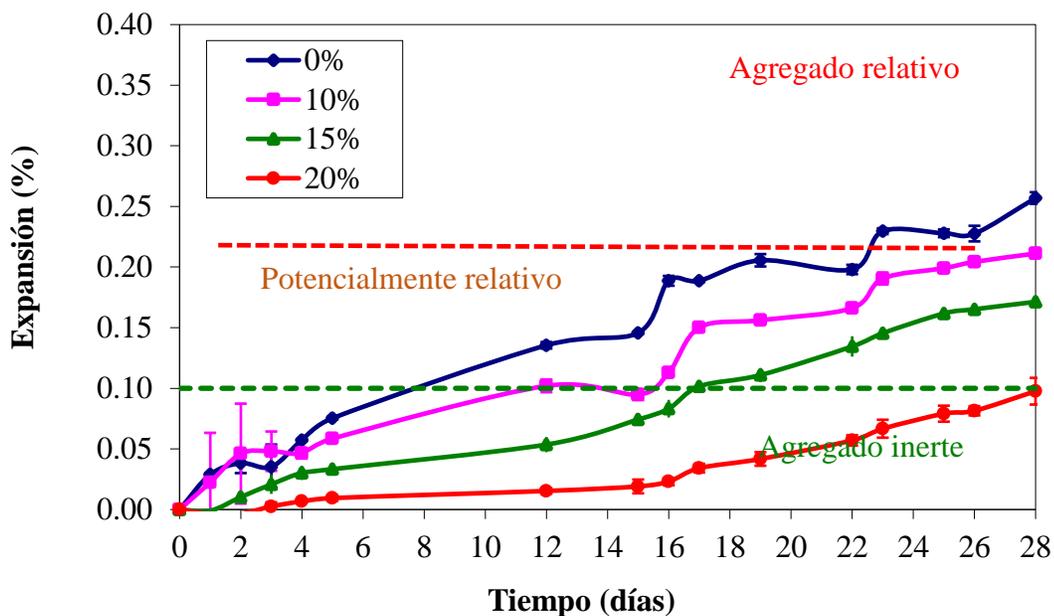


Figura 8. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo adición de 10%, 15%, 20% de Metacaolín.

El comportamiento de las probetas con adición de sílice activa (Figura 7) fue semejante a lo observado por diversos autores (Thomaz, 2011; Hasparyk e Farias, 2013; Lindgard et al., 2012), que verifican que el aumento del contenido de esta adición contribuye para la mitigación de la reacción, debido a las propiedades puzolánicas del material.

Los trabajos citados utilizaron concentraciones máximas de sílice activa entre 12% y 15%, por tanto, en la presente pesquisa, se optó por utilizar concentraciones más elevadas con la intención de verificar si el uso indiscriminado de ese material interfiere en la RAA. Se observó que al alcanzar el contenido de 15%, hubo un estancamiento en la capacidad mitigadora de esta adición. Así al

utilizar concentraciones superiores a este, se espera que no haya una mejoría en el comportamiento del material, pudiendo, inclusive, resultar en un comportamiento invertido, es decir en el aumento de la RAA, ya que una vez que la sílice activa, es una sílice amorfa, y por lo tanto reactiva, se cree que, si es utilizada en exceso, puede ocurrir una “saturación” de ese material en la solución intersticial de los poros de la matriz cementícea. Parte de la sílice activa reaccionará con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como un material puzolánico, y la parte en exceso quedará disponible para reaccionar con los álcalis que no fueron incorporados en la estructura del C-S-H.

El comportamiento de las probetas con adición de metacaolín (Figura 8) fue semejante a lo observado por otros autores (Munhoz, 2007; Hasparyk y Farias, 2013). El aumento del contenido de metacaolín contribuyó para la mitigación de la reacción, debido a las propiedades puzolánicas del material. Se observó una creciente reducción en la reactividad a medida en que se adicionó el metacaolín. La norma determina que la comprobación de la mitigación de la reacción será obtenida cuando el resultado del ensayo acelerado en barras de mortero for menor que 0,10 % a los 16 días (França et. al, 2016). Leugo a partir de los resultados obtenidos, es posible prever que utilizando concentraciones de metacaolín superiores a 15%, habrá mayor reducción de la expansión y será posible mitigar la RAA presentada en este agregado, sin embargo, estos resultados solo se mostraron efectivos al adicionar 20% de este material.

Al comparar el desempeño de las adiciones minerales, se observa que la sílice activa se presentó más efectiva en la mitigación de la ocurrencia de las reacciones álcalis-agregado.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados del presente trabajo, se concluye que:

- Todos los agregados gruesos comercializados en la región metropolitana de Salvador, estudiados en la presente pesquisa, son clasificados como agregados reactivos en cuanto a la ocurrencia de RAA;
- Los agregados finos comercializados en la región metropolitana de Salvador, originados de los depósitos de la región de Camaçari, son clasificados como agregados potencialmente inocuos en cuanto a la ocurrencia de RAA;
- El análisis de desempeño de los morteros ratificó que la utilización de sílice activa y metacaolín mejoran las propiedades de las matrices cementíceas, resultando que los morteros más resistentes a compresión y a tracción por flexión tenían menor permeabilidad;
- La sílice activa mostró capacidad en mitigar las expansiones ocasionadas por la reacción álcalis-agregado, alcanzando el punto de saturación en 15% de adición;
- Cuando es utilizada en exceso puede ocurrir una “saturación” de la sílice activa en la solución intersticial de los poros de la matriz cementícea, así, la cantidad que no reaccionará con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en exceso, quedará disponible para reaccionar con los álcalis que no fueron incorporados en la estructura del C-S-H;
- El metacaolín mostró creciente capacidad en mitigar las expansiones ocasionadas por la reacción álcalis-agregado cuando es aplicada en las concentraciones de 10%, 15% y 20%;
- La sílice activa se mostró más efectivo en cuanto a la mitigación de la RAA en comparación al metacaolín.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de las empresas LC Lacrose, Metacaolín do Brasil, Companhia de Ferro Ligas da Bahia (Ferbasa), Vedacit e Mizu Cementos, que donaron los materiales utilizados en la pesquisa. Agradecemos, también, al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico y

Tecnológico (CNPq) y la Fundación de Apoyo a Pesquisa del Estado da Bahia (FAPESB) por el soporte financiero.

6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). *NBR 5732: Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar - Método de Blaine*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008a). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008b). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro
- Beltrão, F. C. M. (2010), “*A influência do metacaulim nas propriedades do concreto*”, Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p.44.
- Beyene, M., Snyder, A., Lee, R. J., Blaskiewicz, M. (2013), *Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates*. *Cement and Concrete Research*. 51(9). 85-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.014>
- Campos, R. N. (2015) “*Durabilidade em concretos contendo cinza de biomassa contendo elevado teor de álcalis*”, Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, p. 89.
- França, D. F. S., Rey, R. O., Ferreira, L. R. C., Ribeiro, D. V. (2016) *Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland*. *Ambiente Construído*, 16 (3), 153-166, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300098>
- Gamino, A. L. (2003), “*Reações álcali-agregado: análise da potencialidade de ocorrência em agregados utilizados no laboratório de engenharia civil da FEI/UNESP*”. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, pp. 42-54.
- Giordano, B. L. (2007), “*Estudo da reação álcali-agregado dos agregados da região metropolitana de Belém*”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p. 47.
- [Gomez-Zamorano, L. Y.](#), [Iniguez-Sanchez, C. A. E.](#), [Lothenbach, B.](#) (2015), *Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas*. *Revista ALCONPAT*, 5 (1), 18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i1.74>
- Hasparyk, N. P., Farias, L. A. (2013), “*Comportamento de adições e aditivos na expansão da reação álcali-agregado – Um estudo envolvendo reologia*”. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, pp. 1-12.

- Hassan, A. A. A., Lachemi, M., Hossain, K. M. A. (2012), *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites, 34(6), 801– 807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013>
- Lindgard, J., Andiç-Çakir, O., Fernandes, I., Ronning, T. F., Thomas, M. D. A. (2012). *Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing*. Cement and Concrete Research, 42(2), 223-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.004>
- Munhoz, F. A. C. (2007), “*Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato*”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 p.
- Siddique, R. (2011), *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*, Resources, Conservation and Recycling, 55 (11) 923–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Thomas, M. (2011), *The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review*. Cement and Concrete Research, 41(12), 1224–1231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>

Estudio de la durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada

M. Rendón Belmonte¹ , M. Martínez Madrid¹ , R. V. Martínez Pérez¹ , J. T. Pérez Quiroz¹ 

*Autor de Contacto: marielarb17@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

Recepción: 20/06/2018 | Aceptación: 28/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Pedro Garcés Terradillos

RESUMEN

Este artículo describe propiedades referentes a la durabilidad de cinco mezclas de concreto con distintos contenidos de ceniza volante activada (CVA) y cemento portland tipo CPC 40. Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica aparente, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión. Los resultados indicaron que la calidad de todas las mezclas resultó durable, el desarrollo de la resistividad eléctrica y disminución del nivel de permeabilidad al ión cloruro fue favorecido por el contenido de CVA. En cuanto a las resistencias a la compresión, se notó que a mayor contenido de CVA estas resultaron menores. El porcentaje máximo de sustitución de CVA para cumplir con los criterios de durabilidad actuales resultó del 65%.

Palabras clave: ceniza volante activada; durabilidad; concretos ecológicos.

Citar como: Rendón Belmonte, M., Martínez Madrid, M., Martínez Pérez, R. V., Pérez Quiroz, J. T. (2019), “Estudio de la durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 200 – 214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

¹ Instituto Mexicano del Transporte, México.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Study of the durability of concrete mixtures with different contents of activated fly ash

ABSTRACT

This article describes properties related to the durability of five different mixtures of concrete with different contents of activated fly ash (AFA) and Portland cement (CPC 40). The measurements carried out were apparent speed of ultrasonic pulse, electrical resistivity, fast ion permeability of chloride and mechanical resistance to compression. The performance of all mixtures proved to be durable, and the development of the electrical resistivity and the decrease in the level of the chloride ion permeability were enhanced by the contents of AFA, although the resistance to compression at higher contents of AFA was minor. The maximum percentage of AFA to comply with the current criteria of durability was 65%.

Keywords: activated fly ash; durability; ecological concrete.

Estudo da durabilidade de misturas de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas

RESUMO

Este artigo descreve propriedades relativas à durabilidade de cinco misturas de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas (CVA) e cimento portland tipo CPC 40. Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica aparente, permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão. A qualidade de todas as misturas foi duradoura, o desenvolvimento da resistividade elétrica e a diminuição do nível de permeabilidade ao íon cloreto foi favorecido pelo conteúdo de CVA, embora a resistência à compressão em maior conteúdo de CVA tenha sido menor. O percentual máximo de substituição do CVA para atender aos critérios atuais de durabilidade foi de 65%.

Palavras chave: cinza volante ativada; durabilidade; concreto ecológico.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo moderno. Las estimaciones señalan que en el año 2050 el consumo de cemento Portland podría incrementarse hasta un 225% con respecto a los valores actuales, debido principalmente a la elevada demanda de este conglomerante por parte de países emergentes, como pueden ser India, China, Brasil y México (Garcés et al, 2012). De acuerdo con la CANACEM (cámara nacional del cemento) en el 2016 la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas y un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas.

Se sabe que la producción mundial de cemento de 1.6 millones de toneladas representa aproximadamente el 7% de la generación de dióxido de carbono en la atmósfera (Mehta, 2001, Nath et al, 2011). Aunado a esto, estructuras construidas con cemento portland en ambientes corrosivos, comienzan a deteriorarse después de 20 a 30 años, a pesar de que han sido diseñados para más de 50 años de vida de servicio (Chandra et al, 2015). Con la finalidad de reducir el uso de recursos naturales, cantidad de energía y emisiones de dióxido de carbono, se investiga el desarrollo de concretos ecológicos que además de ser amigables con el ambiente, proporcionen sustentabilidad y durabilidad para lograr una vida útil larga de las estructuras (Madhavi et al, 2014; Mishra, 2017).

Algunas opciones consideradas para lograrlo, es el reemplazo parcial de la cantidad de cemento portland (CP) en concreto con materiales tales como puzolanas naturales, humo de sílice, escorias, cenizas volantes (Al-Amoudi et al, 1996; Malhotra, 1990; Mehta, 2002; Garcés et al, 2012; Moffatt et al, 2017; Mishra, 2017; Saha, 2018).

La ceniza volante es un subproducto industrial generado en gran cantidad en todo el mundo, casi 800 millones de toneladas anuales (Heidrich et al, 2013; International Energy Agency Coal Industry Advisory Board, 2014) pero una cantidad significativa de este material (alrededor del 50%) se deposita en vertederos, ocasionando un grave riesgo ambiental y disminución de la reactividad de la ceniza volante debido a las condiciones de intemperismo (Mishra, 2017).

A pesar de que el uso de la ceniza volante como aditivo del concreto es añejo y existe amplia investigación basada en su uso como material de reemplazo de cemento en el concreto, el nivel de reemplazo de acuerdo con literatura disponible aún está limitado a un máximo del 35% de cemento en masa, basado en el argumento que porcentajes de reemplazo mayores de ceniza volante no mejora las características de resistencia en su forma natural (Hemalatha et al, 2017). Con la finalidad de mejorar las propiedades e incrementar los porcentajes de sustitución de ceniza volante, se han explorado diferentes enfoques, tales como: reducción de la relación agua / material cementicio, sustitución de cemento portland de alta resistencia inicial por cemento portland ordinario, reemplazo de una porción de la ceniza volante por una puzolana más reactiva como humo de sílice o ceniza de cáscara de arroz, incorporación de nanomateriales, curado acelerado (Yu et al, 2017). Se han utilizado también métodos químicos, mecánicos, térmicos, o la combinación de estos con el objetivo de mejorar la reactividad de este deshecho (Mucsi, 2016; Sahoo, 2016). La activación alcalina consiste en un proceso químico que permite la transformación de un material con una estructura parcial o totalmente amorfa en compuestos cementantes compactos (Palomo et al., 1999). La activación mecánica es definida como la activación por medio de un proceso de molienda o por medio de tamizado y separación de aire y la activación térmica se refiere al lento o rápido enfriamiento produciendo cambios en la relación vítreo/cristalino (Hela et al, 2013; Mucsi, 2016). Además de estos métodos, existe la electrometagénesis, que consiste en la activación de la ceniza volante a partir del ingreso de iones de una solución alcalina mediante la aplicación de un campo eléctrico a través del concreto endurecido (Lizarazo et al., 2015). Hoy en día el uso de la ceniza volante es considerado como una solución efectiva (Zobal et al, 2017).

Considerando los antecedentes del uso de la ceniza volante, efectos positivos en las propiedades de los concretos, bajo costo y disponibilidad actual de ceniza volante en México (almacenada), este artículo se centra en determinar propiedades tales como: calidad del concreto (VPU), resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión, de mezclas con diferentes contenidos de cemento portland tipo CPC 40 (cemento hoy en día más comercial y empleado en la construcción) y ceniza volante mexicana sometida a un proceso de activación química mediante el uso de químicos en polvo y método de molienda, con el objetivo de mejorar su reactividad, contribuir y enriquecer información que promuevan su uso en el sector de la construcción civil en nuestro país. Debido a la existencia de un contrato de confidencialidad, la caracterización de las mezclas evaluadas todavía no se puede revelar.

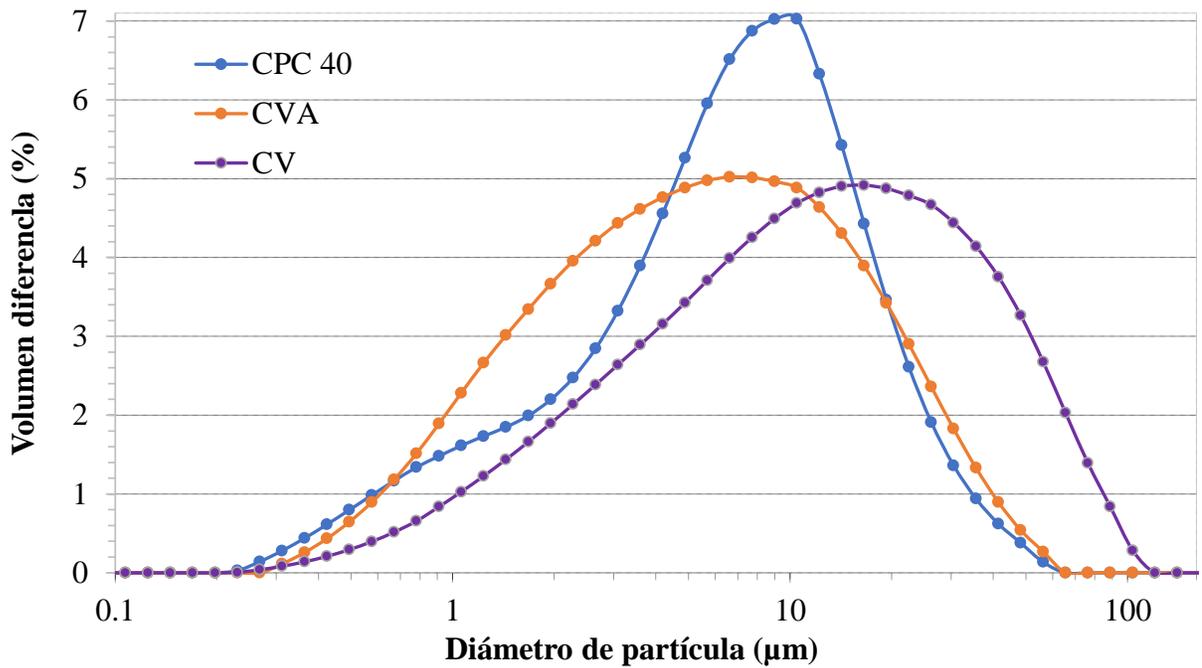
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales de partida

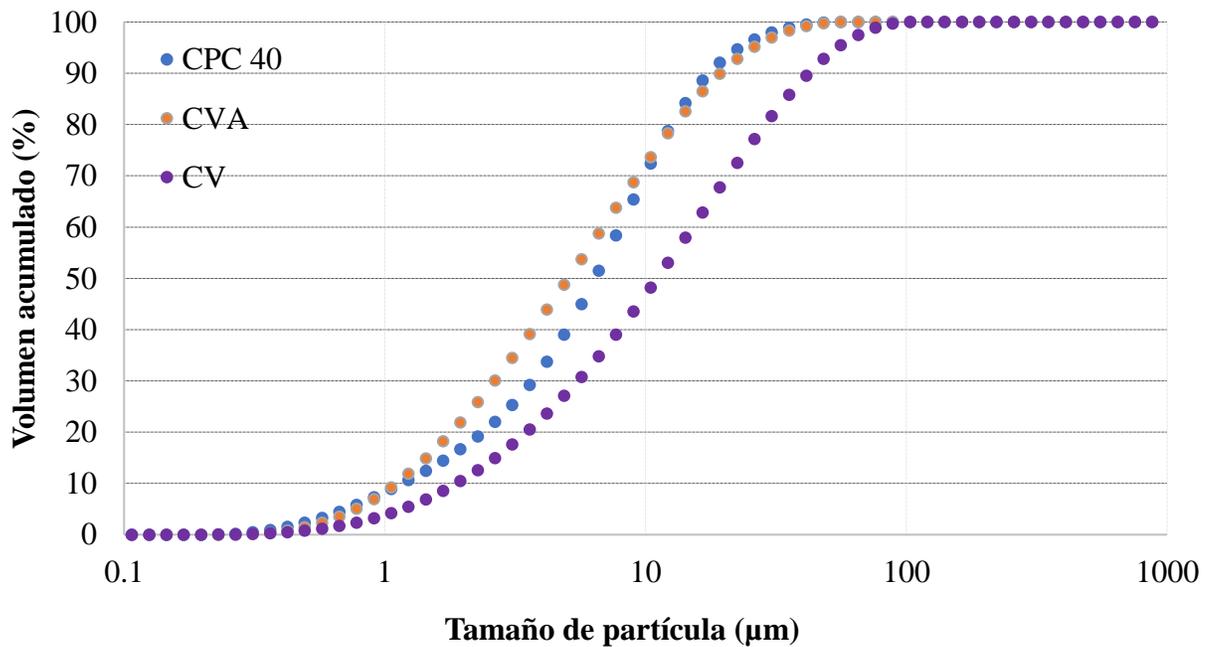
Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó cemento portland tipo CPC 40 marca comercial, ceniza volante activada mediante la adición de químicos en polvo y molienda en molino de bolas (CVA), agregados producto de la trituración de roca caliza y agua de red potable.

La distribución de granulometría del cemento (CPC 40), ceniza volante empleada previo a la molienda (CV) y posterior a la molienda (CVA) se muestra en la Figura 1. Este análisis se obtuvo

por láser scattering. La suspensión de partículas se preparó en etanol empleando como medio de dispersión un baño ultrasonido durante 5 minutos y se empleó la aproximación Fraunhofer.



1a) Distribución de partícula de los materiales de partida



2a) Tamaño de partícula de los materiales de partida

Figura 1. a) Distribución de partícula y b) tamaño de partícula de los materiales de partida

La Tabla 1 muestra características de los agregados utilizados, valores obtenidos de acuerdo con las Normas ASTM C127 y C128.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas

Material	Densidad (Kg/l)	Absorción (%)
Grava 5-20 mm (caliza triturada)	2.67	0.9
Arena 0-5 mm (caliza de mina/triturada)	2.40	2.40

2.2. Elaboración de probetas

Se fabricaron cinco mezclas con diferentes porcentajes de sustitución de CVA (0, 30, 50, 65 y 75%) respecto al peso de cemento denominadas como: M1, M2, M3, M4 y M5 respectivamente. La relación agua/material cementante fue 0,35. Para lograr esta relación se utilizó reductor de agua y aditivo fluidizante. Las proporciones de las mezclas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de las cinco mezclas.

Material	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5
Cemento CPC 40	Kg/m ³	450	315	225	157.5	112.5
CVA	Kg/m ³	0	135	225	292.5	337.5
Grava	Kg/m ³	1006	1006	1006	1006	1006
Arena	Kg/m ³	710	710	710	710	710
Condición de curado	°C	Cuarto de curado				
a/mc		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

*mc: material cementicio (CVA+CPC)

De cada mezcla se obtuvieron 39 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud, fabricados de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-159-16, hidratadas con agua potable del suministro municipal y curado conforme a la norma NMX-C-148-10. Posterior al período de curado (28 días), todas las muestras se retiraron del cuarto de curado y se mantuvieron a temperatura ambiente y en condición húmeda, condición lograda con rociado de agua potable diario y resguardo en contenedores de plástico con tapa.

2.2. Ensayos de durabilidad

Los ensayos que se realizaron fueron: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) (ASTM C-597-02), resistividad eléctrica (ρ) (NMX-C514-16), permeabilidad rápida al ión cloruro (ASTM C1202-10) y resistencia mecánica a la compresión (NMX C-083-02) a diferentes edades por un período de 122 días. Cabe mencionar que en cada edad de ensayo de VPU y resistividad eléctrica se evaluaron quince cilindros de cada mezcla, para el caso de la resistencia mecánica a la compresión se ensayaron tres cilindros y en la prueba de permeabilidad rápida al ión cloruro se evaluaron dos muestras.

3. RESULTADOS

A continuación, se describen los resultados de cada ensayo realizado.

3.1 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La Figura 2 presenta el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico.

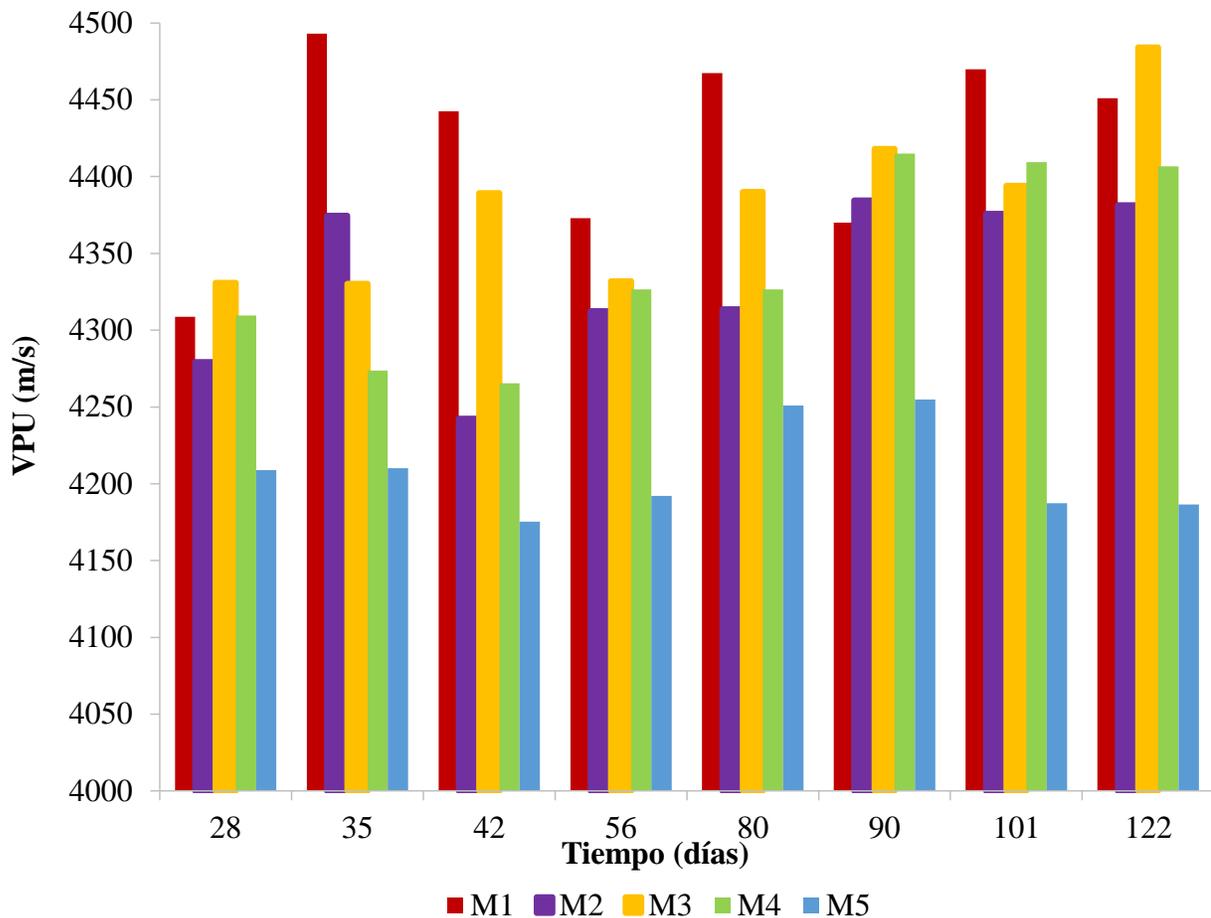


Figura 2. Velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

Los valores de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos en las cinco mezclas y todas las edades de ensayo, reportados en la Figura 2 resultaron superiores a 4000 m/s, indicando que la calidad en todos los casos resultó durable. No obstante, en la mezcla con mayor contenido de CVA (M5) se apreciaron valores menores respecto al resto de las mezclas, este comportamiento quizás sea consecuencia de la falta de hidróxido de calcio contenido en la mezcla y proporcionado por el cemento portland.

Considerando los resultados de VPU obtenidos en esta investigación con CVA e información reportada por Al-Amoudi quien evaluó mezclas de concreto con y sin reemplazo de cemento portland por ceniza volante (hasta un 40%) los valores oscilaron en el mismo orden ~ 4000 m/s (Al-Amoudi et al, 1996).

3.2 Resistividad eléctrica (ρ)

La Figura 3 presenta el comportamiento de la resistividad eléctrica aparente de las cinco mezclas fabricadas respecto al tiempo. Cabe mencionar que la norma NMX C-514-16 define resistividad eléctrica aparente como la resistividad medida sobre el concreto no saturado con agua, condición en la que se obtuvieron las mediciones reportadas.

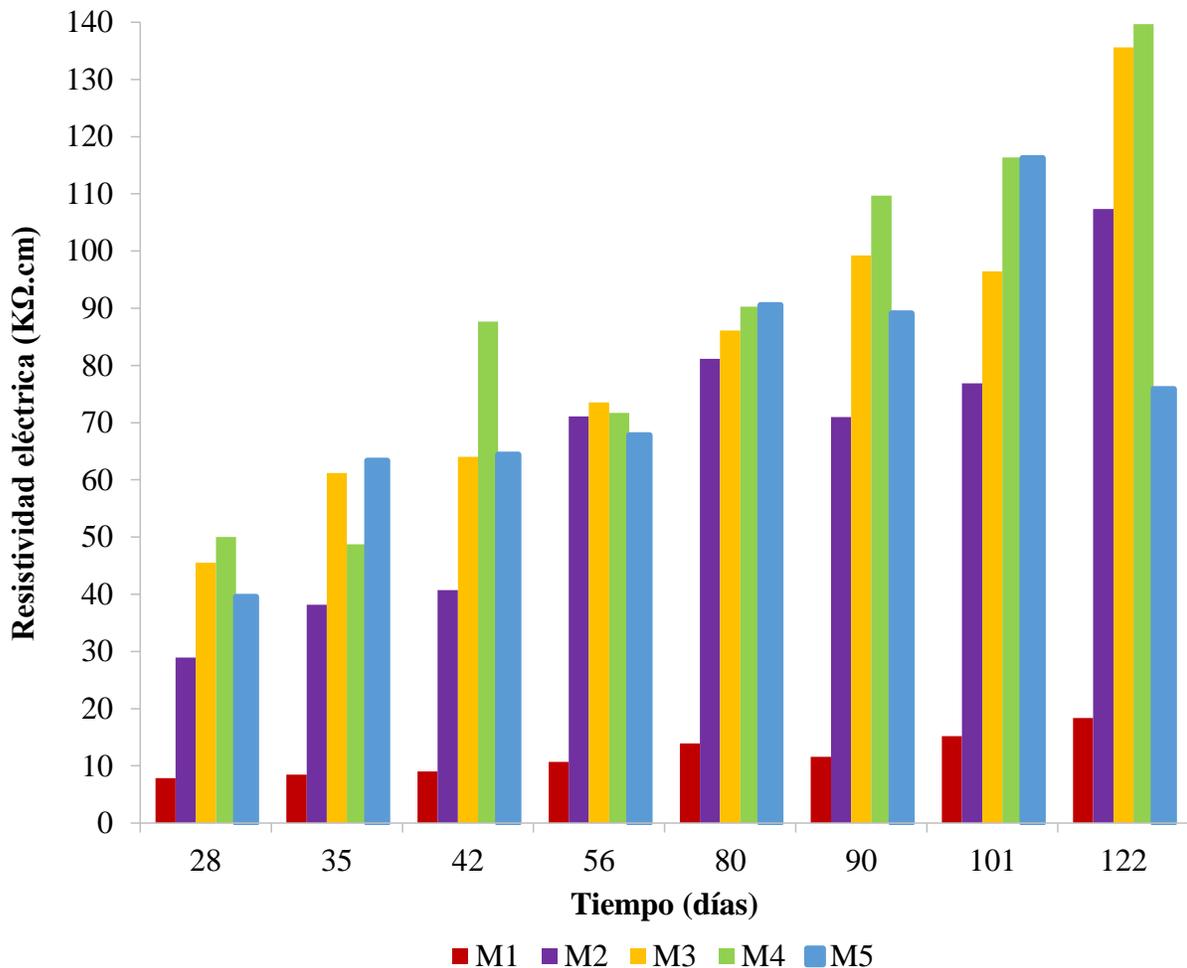


Figura 3. Resistividad eléctrica aparente a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

De acuerdo con la Figura 3, las mezclas con contenido de ceniza volante activada mostraron valores de resistividad eléctrica superiores a la mezcla sin contenidos de CVA (M1), mezcla que alcanzó un máximo de 18 KΩ.cm. Después de 122 días, M2 logró valores de 110 KΩ.cm, mientras las mezclas M3 y M4 alcanzaron valores cercanos a 140 KΩ.cm. En el caso de M5 se observó un decaimiento de resistividad en la medición del día 122, de valores de 116 a 76 KΩ.cm, fecha en la que también se observó un incremento en el valor de permeabilidad al ión cloruro como muestra la Figura 3. Este comportamiento se piensa que puede deberse a dos posibles causas: 1) a esta edad la reacción de la CVA es más sensible al contenido de humedad existente en la matriz del concreto, ralentizando su reacción o 2) el contenido de ceniza en la mezcla es excesivo para mantener una reacción constante de la CVA.

Sin embargo, aun con el descenso visto en la M5, los valores de resistividad eléctrica de las mezclas con CVA superaron los alcanzados con la mezcla M1 (0% ceniza volante).

Considerando los criterios establecidos en la norma mexicana NMX C-514-16 y valores de la Figura 3, la mezcla M1 mostró una porosidad interconectada de consideración, mientras las mezclas M2, M3 y M4 indicaron porosidad interconectada extremadamente baja y M5 porosidad interconectada baja.

3.3 Permeabilidad rápida al ión cloruro

La Figura 4 presenta el comportamiento de la prueba de permeabilidad rápida del ión cloruro de las cinco mezclas fabricadas. Los valores reportados corresponden a edades de 28, 56, 90 y 122 días.

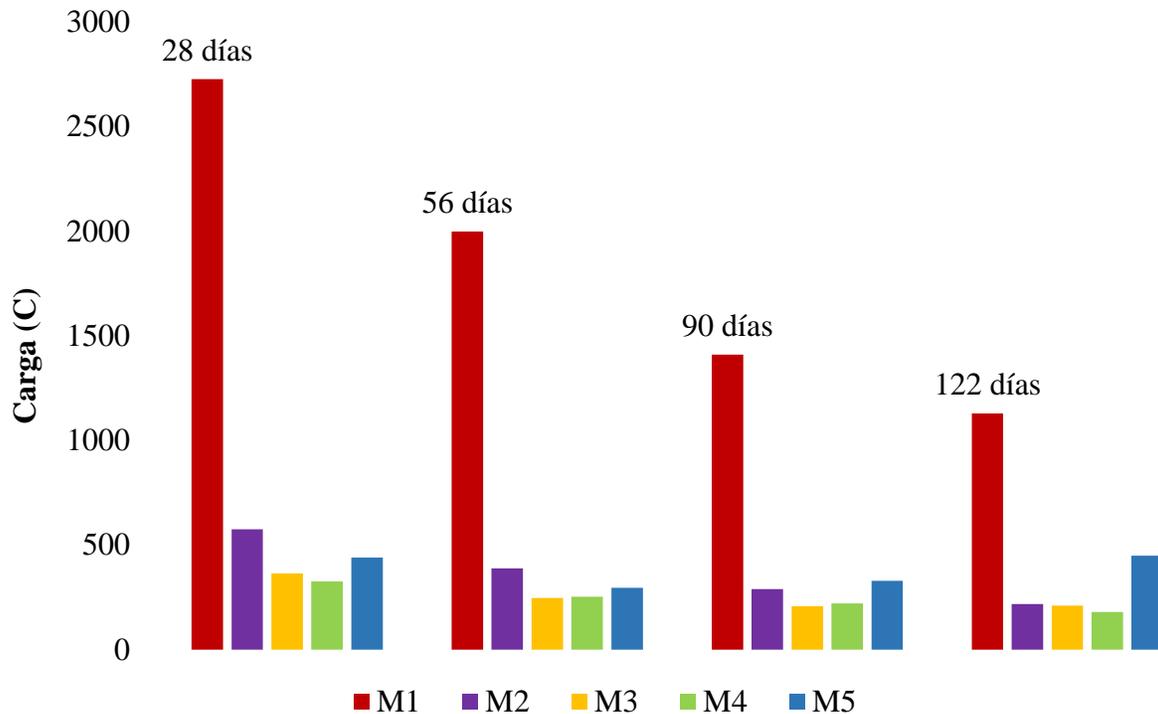


Figura 4. Permeabilidad rápida al ión cloruro a diferentes edades de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

Tomando en cuenta los valores de la Figura 4 y criterios establecidos en la norma ASTM C-1202-12, los resultados de la mezcla sin ceniza volante activada (M1), inicialmente mostraron valores superiores a 2500 C, pero conforme el transcurso del tiempo disminuyó alcanzando después de 122 días valores de 1100 C, con estos valores esta mezcla alcanzó un nivel de penetrabilidad del ión cloruro moderado y posteriormente bajo.

Para las mezclas con contenido de ceniza volante activada, la cantidad de carga que pasó en todas las edades de evaluación resultaron menores a 500 Culombios (C), consiguiendo un nivel muy bajo de penetrabilidad del ión cloruro. La tendencia de permeabilidad respecto al tiempo de las mezclas M2, M3 y M4 fue descendente, solo para el caso de la mezcla M5 el comportamiento fue variable, pero en ningún tiempo superó los 500 C.

Las mezclas con contenido de ceniza volante activada mostraron menor permeabilidad al ión cloruro respecto a la mezcla sin ceniza volante activada, estos resultados coinciden con investigaciones que reportan que la presencia de ceniza volante promueve un nivel bajo de permeabilidad a este ión (Malhotra, 1990; Nath et al, 2011; Saha, 2018; Mittal).

3.4 Resistencia mecánica a la compresión

La Figura 5 muestra las resistencias mecánicas a la compresión y la desviación estándar (σ en MPa) obtenida a partir de tres ensayos por mezcla a edades de 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días, obtenidas conforme a la norma NMX-C-083-14.

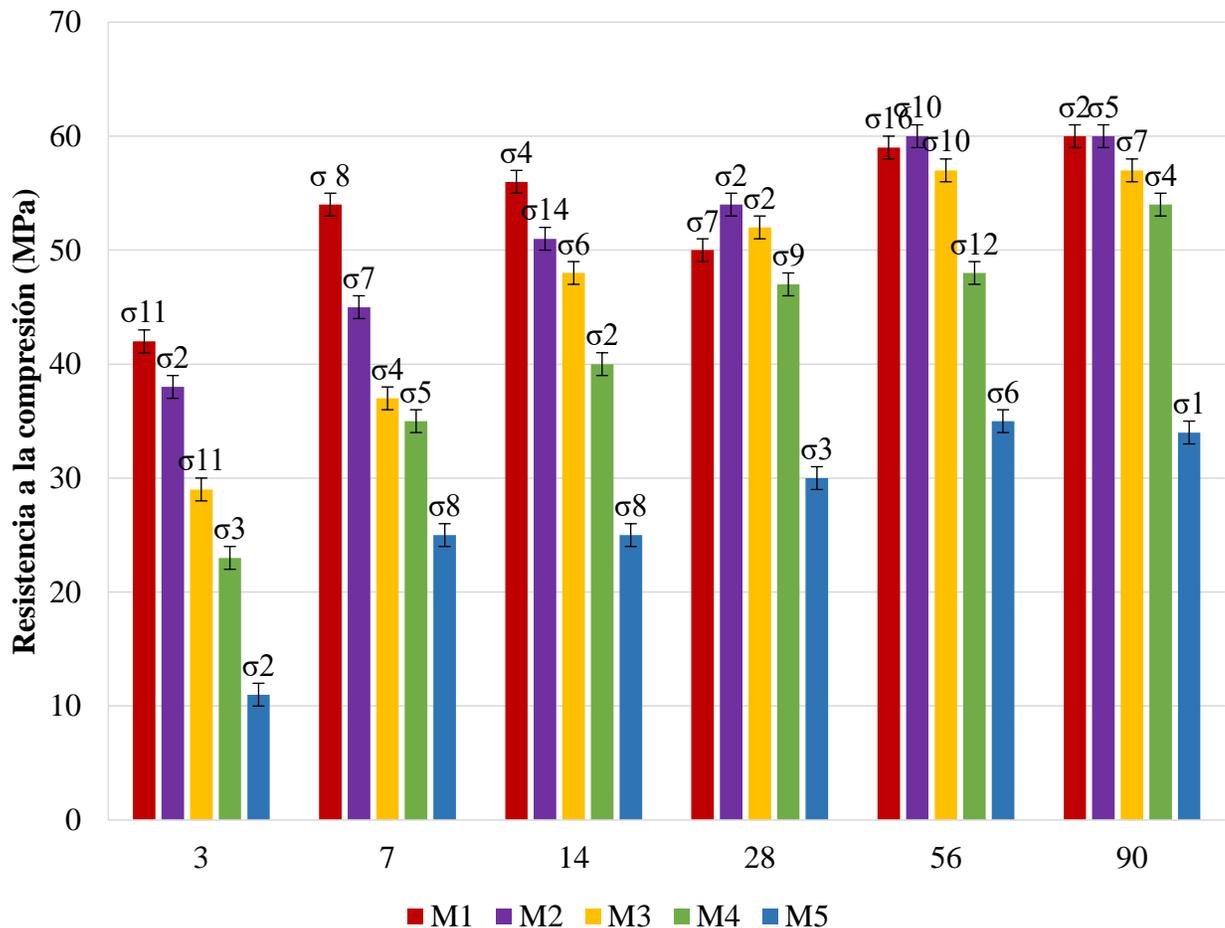


Figura 5. Resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5

De acuerdo con la Figura 6, la resistencia a la compresión a edades tempranas (3 y 7 días) de las muestras con contenido de ceniza volante activada resultó menor respecto a las muestras control (0% de ceniza volante activada), sin embargo, con el paso del tiempo ascendieron gradualmente, comportamiento asociado con la lenta reacción puzolánica de la ceniza volante (Nath y Sarker, 2011; Mishra, 2017; Saha, 2018).

Los valores de resistencia mecánica de la mezcla M1 detuvieron su desarrollo después de 56 días con valores de 60 MPa. En el caso de las mezclas M2 y M3 después de 14 días fueron mayores a 45 MPa, mientras M4 después de 28 días. La mezcla M5, mostró valores de resistencia ascendentes con el tiempo, pero, en todas las edades la resistencia mecánica resultó menor al resto de las mezclas, consiguiendo valores máximos de 35 MPa, este resultado es atribuido principalmente a la falta de hidróxido de calcio en la mezcla (Saha, 2018), aportado principalmente por el cemento portland, que en este caso el contenido en la mezcla M5 fue del 25% respecto al peso total de material cementicio.

Los valores de resistencia a la compresión fueron menores a mayor contenido de ceniza volante activada en la mezcla, aunque, a la edad de 28 días las mezclas M2, M3 y M4 superaron los 45 MPa, valor de resistencia mecánica considerado para concretos considerados de elevada resistencia de acuerdo con el Manual de la Red Durar.

3.5 Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica a la compresión

La Figura 6 muestra el comportamiento de la resistividad eléctrica respecto a la resistencia mecánica de las cinco mezclas después de 7, 14, 28, 56 y 90 días.

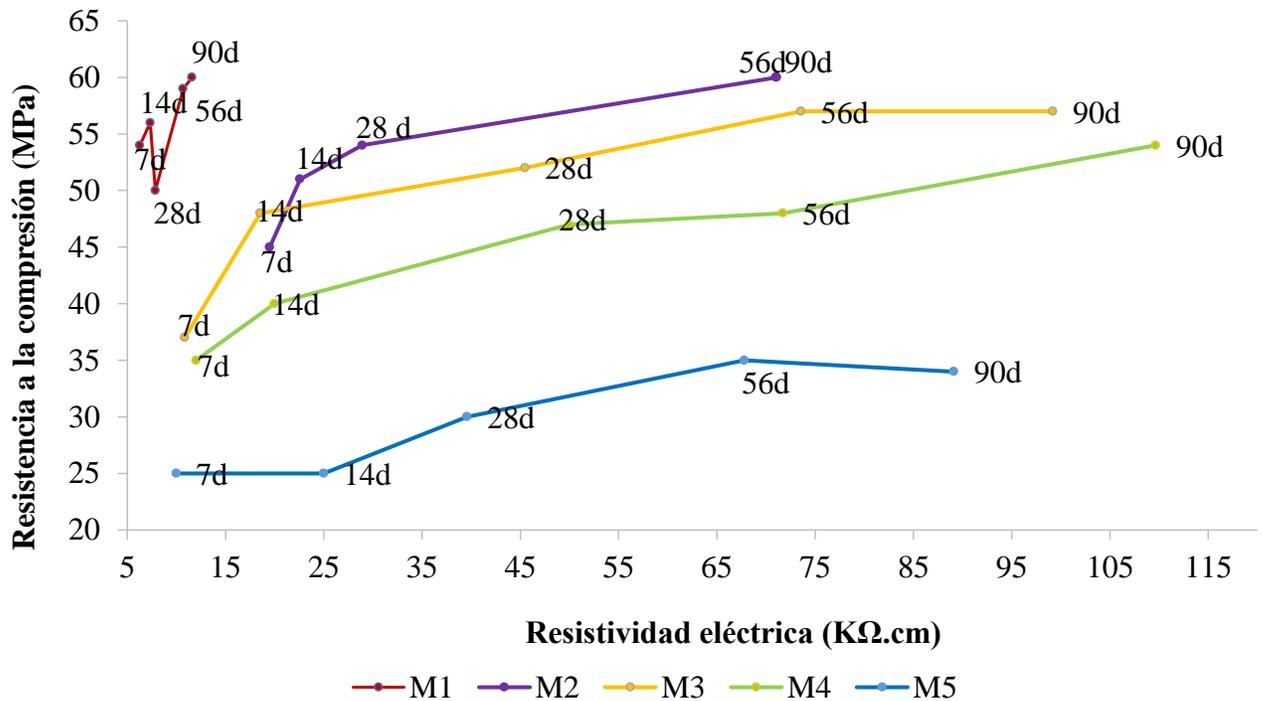


Figura 6. Resistividad eléctrica vs resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 7,14,28,56 y 90 días

De acuerdo con la Figura 6, la mezcla M1 mostró valores de resistividad eléctrica de manera ascendente respecto al paso del tiempo, el valor inicial (7 días) resultó ser de 6 KΩ.cm y la final (90 días) de 12 KΩ.cm. En cuanto a la resistencia a la compresión, la inicial fue de 54 MPa y la final de 60 MPa. Para este caso, aun cuando hubo incremento en ambos parámetros respecto al tiempo, no fue considerable como se observó en las mezclas con contenidos de ceniza volante activada (M2, M3, M4 y M5), donde fue evidente que a medida que el tiempo transcurrió, la resistividad eléctrica y resistencia a la compresión incrementaron. Este comportamiento progresivo, en las mezclas con contenidos de ceniza volante se atribuye al beneficio que brinda la ceniza volante en la compacidad del concreto respecto al tiempo.

En todas las mezclas se determinó que la evolución de la resistividad es paralela a la de la resistencia, comportamiento reportado también por Andrade (Andrade y D'Andrea, 2011).

Considerando que la resistencia mecánica a la compresión considerada para un concreto durable deber ser al menos > 45 MPa y una resistividad eléctrica >50 KΩ.cm, los porcentajes que cumplieron resultaron las mezclas con porcentajes del 30, 50 y 65% de CVA.

3.6 Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica

La Figura 7 muestra el comportamiento de compacidad del concreto (VPU) respecto a la resistencia mecánica de las cinco mezclas después de 7, 14, 28, 56 y 90 días.

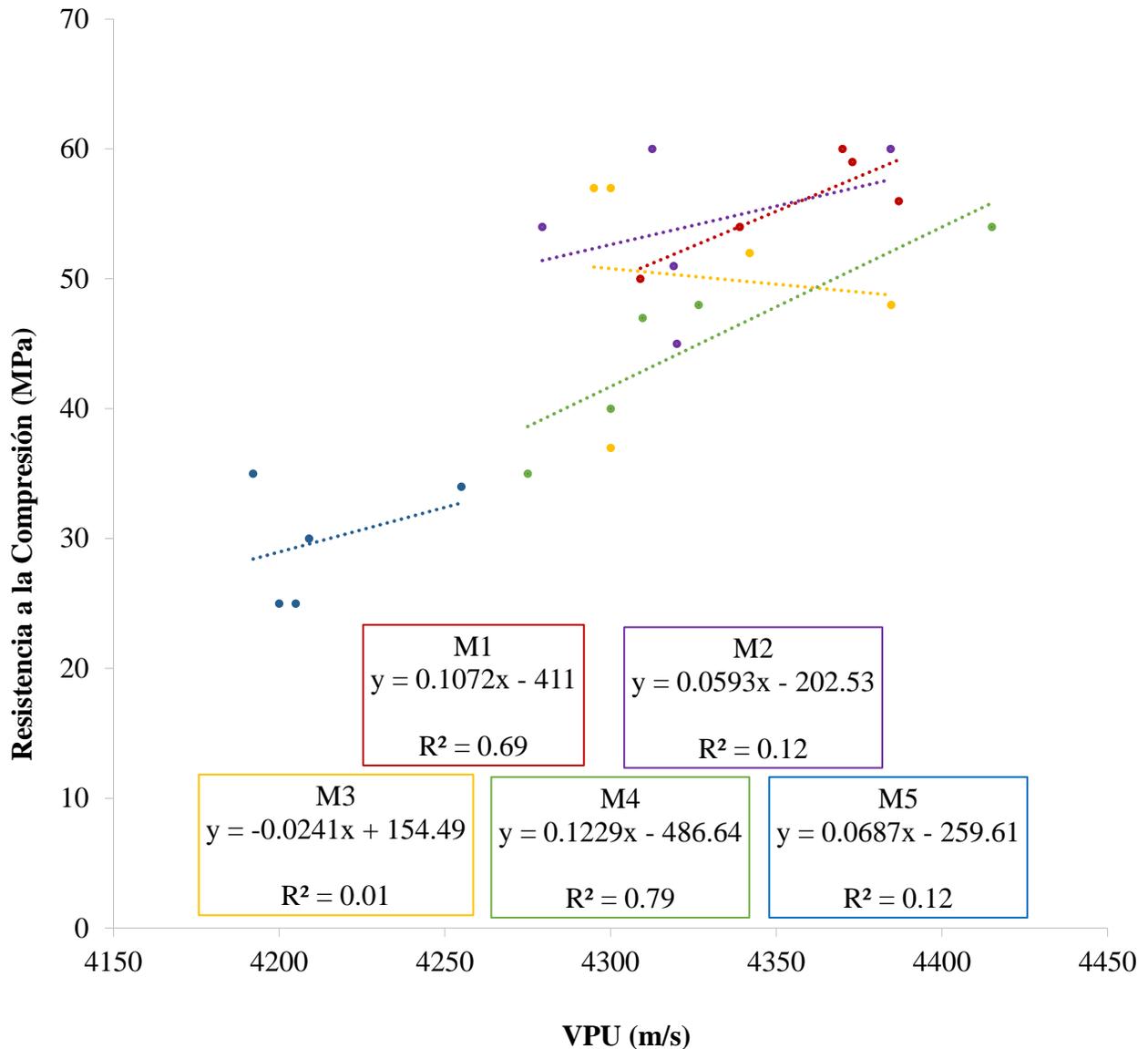


Figura 7. Velocidad de pulso ultrasónico vs resistencia mecánica a la compresión de las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 7,14,28,56 y 90 días

De acuerdo con la Figura 7 se observó que las mezclas M1 y M2 se ubicaron en valores mayores a 4275 m/s y 45 MPa en todas las edades evaluadas. Para el caso de M3 y M4 en todas las edades los valores de VPU fueron mayores a 4275 m/s pero la resistencia a 7 días fue menor a 45 MPa, valor que con el transcurso del tiempo incrementó. Solo para el caso de la mezcla M5, los valores de resistencia mecánica y VPU resultaron menores respecto a las mezclas con y sin contenido de ceniza volante activada, comportamiento atribuido al alto contenido de ceniza volante (75%) y bajo contenido de hidróxido de calcio (25% CPC 40). A partir de estos resultados se observa que a valores de VPU menores a 4250 m/s las resistencias mecánicas obtenidas fueron menores a 35 MPa (M5) y cuando los valores de VPU superaron los 4250 m/s las resistencias resultaron mayores a 35 MPa. Sin embargo, observando los valores de R^2 indican que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia mecánica a la compresión, no son proporcionales, por lo tanto, es necesario valorar cada parámetro de manera independiente.

3.7 Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro

La Figura 8 demuestra que la resistividad eléctrica tiene correlación con la resistencia a la penetración de los cloruros. Se observó que a mayor resistividad eléctrica el nivel de permeabilidad resultó menor. Las mezclas con contenido de ceniza volante activada superaron los valores de resistividad eléctrica respecto a los obtenidos con M1 (mezcla sin ceniza volante activada) y como consecuencia el nivel de permeabilidad fue menor. Considerando que la resistividad del concreto aumenta con el tiempo debido al refinamiento de la estructura del poro (Andrade et. al., 2009), la presencia de la ceniza volante favoreció el refinamiento de la estructura poro originando menor permeabilidad.

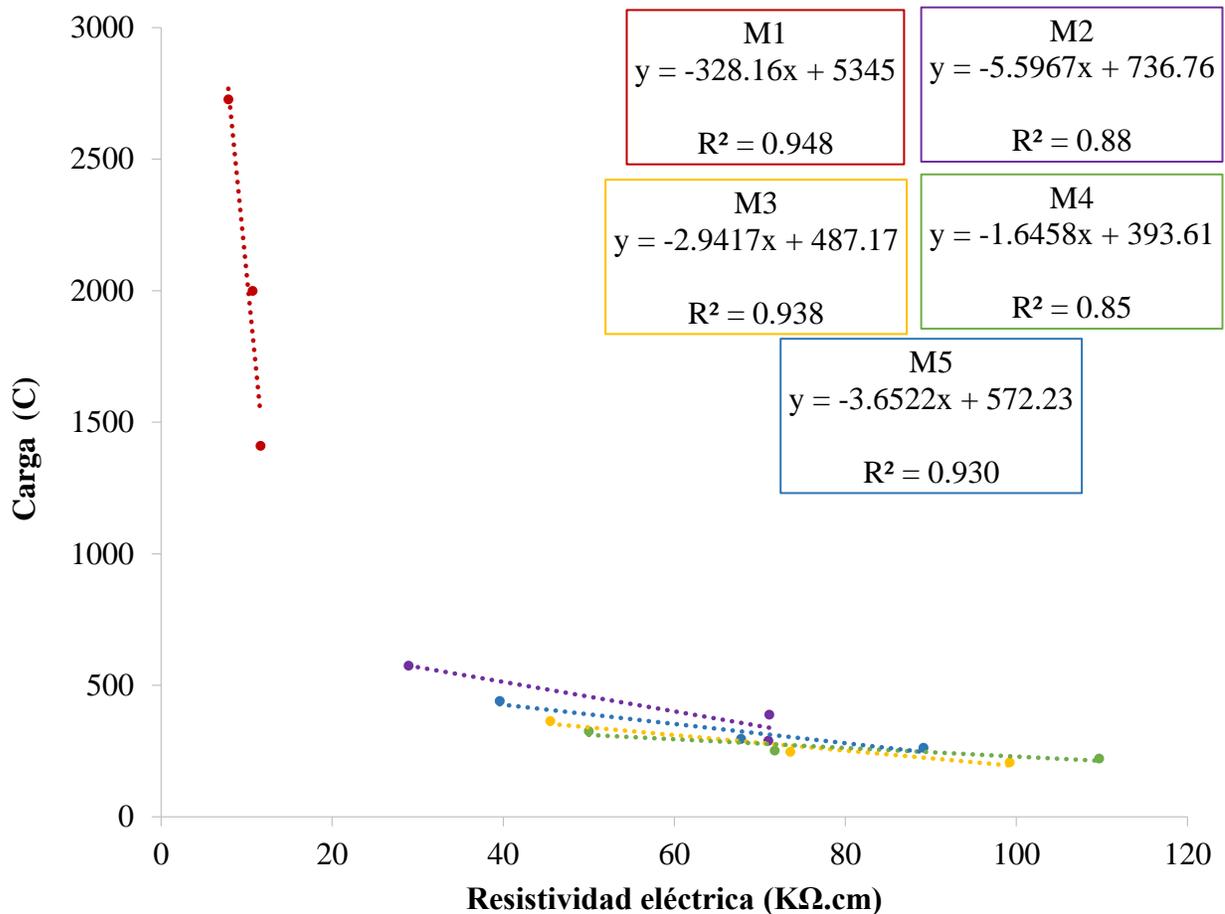


Figura 8. Resistividad eléctrica vs permeabilidad rápida al ión cloruro de M1, M2, M3, M4 y M5 obtenidas a edades de 28, 56 y 90 días

4. CONCLUSIONES

1. El uso de la ceniza volante activada como material de sustitución de cemento portland CPC 40 en mezclas de concreto, favorece el incremento de la resistividad eléctrica, por lo tanto, el transporte de agentes agresivos es mucho menor que en la mezcla sin adición de ceniza volante activada.
2. El nivel de permeabilidad del ión cloruro en las mezclas de concreto con contenidos de ceniza volante resultó muy bajo, esto expresa que la ceniza volante sometida a un

tratamiento químico y mecánico es favorable para alcanzar materiales poco permeables a este ión, lo que beneficia su durabilidad.

3. El comportamiento de la resistencia mecánica de las mezclas con porcentajes del 30, 50 y 65% de ceniza volante activada después de 28 días resultaron mayores a 45 MPa, esto apunta a que es posible fabricar concretos con un desarrollo sostenible para el sector de la construcción que no requiere resistencias altas a temprana edad.
4. Actualmente se estudia el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en las mezclas descritas, resistencia a sulfatos y la caracterización de los productos de reacción, resultados que se reportarán en trabajos futuros.

5. REFERENCIAS

- Al-Amoudi, O., Maslehuddin, M., Asi, I. (1996), "Performance and Correlation of the Properties of Fly Ash Cement Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, No. 2, pp. 71-77, DOI: <https://doi.org/10.1520/CCA10153J>. ISSN 0149-6123
- Andrade, C., D'Andrea, R. (2011), "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista ALCONPAT, V.1, No.2, pp. 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Andrade, C., d'Andréa, R., Castillo, A., Castellote, M. (2009), *The use of electrical resistivity as NDT method for specification the durability of reinforced concrete*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd
- ASTM International. (2002). *ASTM C597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- ASTM International. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0642-13>
- ASTM International. (2015). *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM International. (2015). *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- Chandra Debanath, O., Saiful Islam, Md., Moinul Islam, Md. (2015), "Use of Geopolymer Concrete as Green Construction Material- A Review", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE 2015) 26 – 29 November, 2015, Chittagong, Bangladesh
- DURAR (1998), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática Durabilidad de la armadura. 2a Edición
- Garcés, P., Zornoza, E., Baeza, F., Galao, O., Payá, J. (2012), "¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?", Revista ALCONPAT, V.2, No.2, pp. 57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i2.27>
- Hela R., Orsáková, D. (2013), "The Mechanical Activation of Fly Ash", Procedia Engineering V.65, pp. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.016>
- Heidrich, C., Joachim Feuerborn, H., Weir, A. (2013), "Carbon combustion products: a global perspective". World Conference of Coal Ashes, pp. 22-25. URL: <http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>

- Hemalatha, T., Ramaswamy, A. (2017), “*A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete*”, Journal of Cleaner Production, V.147, pp. 546-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- International Energy Agency (2014), “*The Impact of Global Coal Supply on Worldwide Electricity Prices*”. Report by the IEA Coal Industry Advisory Board, pp. 55, URL: https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ImpactGlobalCoalSupply_WorldwideElectricityPrices_FINAL.pdf
- Lizarazo Marriaga, J., García, F., Higuera Flórez, C. (2015), “*Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química*”, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, V. 35, No.2, pp. 305-314. eISSN: 2244-7113
- Madhavi, T. Ch., Swamy Raju, L., Mathur, D. (2014) “*Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete*”, Journal of Civil Engineering Research, V. 4, pp. 7-11. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201401.02.html>
- Malhotra, V. M. (1990), “*Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash*”, Cement and Concrete Composites, Volume 12, Issue 4, Pages 271-277, DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90006-J)
- Malhotra, V. M. (1985), “*Métodos no destructivos para evaluar concreto*”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Moffatt, E., Thomas, M., Fahim, A. (2017), “*Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment*”, Cement and Concrete Research, V.102, pp. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>
- Mehta, K. (2001), “*Reducing the environmental impact of concrete*”, Concrete International, pp. 61-66. URL: <http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>
- Mehta, K. (2002), “*Greening of the concrete industry for sustainable development*”, Concrete international, 24 (7) pp. 23-28.
- Mishra, D. K., Yu, J., Leung, C. K. Y. (2017), “*Very high volume fly ash green concrete for applications in India*”, Global Waste Management, International Society of Waste Management, Air and Water. pp. 480-487.
- Mittal, A., Kaisare, M. B., Shetti, R. “*Experimental Study on use of fly ash in concrete*”, Tarapur Atomic Power Project 3 & 4, Nuclear Power Corporation of India Limited URL: https://www.sefindia.org/forum/files/experimental_study_on_use_of_fly_ash_in_concrete_by_mr_amit_mittal_136.pdf
- Mucsi, G. (2016), “*Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review*”, Journal of Silicate Based and Composite Materials, V. 68, No. 2, pp. 56-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- Nath, P., Sarker, P. (2011) “*Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*”, Procedia Engineering V.14, pp. 1149-1156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2010), *NMX-C-105-ONNCCE-2010: Industria de la Construcción-Cementos hidráulicos Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos*”.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2014), “*NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción Concreto Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Método de Ensayo*”.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2016), “*NMX-C-159-ONNCCE-2016: Concreto, elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*”.

- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) (2016), “*NMX-C-413-ONNCCE-2016: Industria de la Construcción Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico Especificaciones y Métodos de Ensayo*”.
- Palomo, A., Grutzeck, M., Blanco, M. (1999), “*Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*”, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 8, August, Pages 1323-1329, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Saha, K. A. (2018), “*Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*”, Sustainable Environment Research, Volume 28, Issue 1, January, Pages 25-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Sahoo, S., (2016), “*A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength*”, Journal of Basic and Applied Engineering Research, Volume 3, Issue 10; July-September 2016, pp. 883-887. e-ISSN: 2350-0255, <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html>
- Yu, J., Lu, C., Leung, C. K. Y., Li, G. (2017). *Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash*. Construction and building materials, 147, pp. 510-518. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- Zobal, O., Reiterman P., Plachý, T., Bittnar, Z. (2017), “*Durability of Concrete with Fly Ash from the Dam Orlik after 55 Years*”, Advanced Materials Research, V.1144, pp. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1144.81>

Reutilización de efluentes en la fabricación de bloques de concreto para albañilería

A. Plaza Meurer¹ , R. Alves Amorim¹ , L. Carvalho Quintanilha¹ , D. Cardoso Parente^{*1,2} 

* Autor de Contacto: denisparente@yahoo.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.278>

Recepción: 26/10/2017 | Aceptación: 29/05/2018 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Paulo Helene

RESUMEN

En este trabajo se evalúa la utilización del agua de reutilización proveniente de estaciones de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de bloques huecos de concreto simple. El uso de esos bloques ha sido adoptado como opción de racionalización de la composición de la albañilería para mampostería tradicional y estructural, por permitir reducción de pérdidas de materiales y capas de revestimiento. Fabricados a partir de la mezcla de aglomerante, agregado y agua, en promedio 60 m³ de concreto, necesarios para la producción de 12.350 bloques (14 x 19 x 39 cm), consumiría 4.500 l de agua. El estudio comprende el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los bloques dosificados con el efluente y los resultados muestran que esas propiedades permanecen inalteradas, lo que puede viabilizar la utilización del efluente.

Palabras clave: reutilización del agua; bloque de concreto; aguas residuales tratadas.

Citar como: Plaza Meurer, A., Alves Amorim, R., Carvalho Quintanilha, L., Cardoso Parente, D. (2019), " *Reutilización de efluentes en la fabricación de bloques de concreto para albañilería*", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 215 – 227, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.278>

¹ Universidad Federal do Tocantins - UFT, Brasil.

² Centro Universitário Luterano de Palmas - CEULP/ULBRA, Brasil.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Effluent reuse in the manufacture of concrete blocks for sealing masonry

ABSTRACT

This work seeks to assess the use of reuse water from sewage treatment stations in the manufacture of simple concrete hollow blocks. The use of these blocks has been adopted as a rationalization option in the composition of the sealing and structural masonry, providing a reduction in the losses of materials and layers of coating. Made from the mixture of agglomerate, aggregate and water, around 60 m³ of concrete, required for the production of 12,350 blocks (14 x 19 x 39 cm), would consume 4, 500 l of water. The study includes the analysis of the physical and mechanical properties of effluent dosed blocks. Consequently, the results show that these properties remain unchanged, which can make the effluent use viable.

Keywords: Reusing water; concrete block; treated effluent.

Reuso de efluentes na fabricação de blocos de concreto para alvenaria de vedação

RESUMO

Este trabalho busca avaliar a utilização da água de reuso proveniente de estações de tratamento de esgoto na fabricação de blocos vazados de concreto simples. O uso desses blocos tem sido adotado como opção de racionalização na composição da alvenaria de vedação e estrutural, por permitir redução nas perdas de materiais e camadas de revestimento. Fabricados a partir da mistura de aglomerante, agregado e água, em média 60 m³ de concreto, necessários para produção de 12.350 blocos (14 x 19 x 39 cm), consumiria 4.500 l de água. O estudo compreende a análise das propriedades físicas e mecânicas dos blocos dosados com efluente e os resultados mostram que essas propriedades permanecem inalteradas, o que pode viabilizar a utilização do efluente.

Palavras chave: água de reuso; bloco de concreto; efluente tratado.

1. INTRODUCCIÓN

Según Visvanathan y Asano (2001), el desarrollo industrial descontrolado provocó el agotamiento y la contaminación de los recursos hídricos, haciendo necesario reglamentaciones cada vez más rigurosas que obliguen a las industrias a reducir el consumo de agua potable. El autor además afirma que los avances tecnológicos permiten el tratamiento de aguas residuales para una diversidad de reutilizaciones industriales.

Otro punto relevante es la reutilización del agua, que se presenta como una de las soluciones para enfrentar la crisis hídrica. Según datos del World Bank (2015), aproximadamente 90% del agua residual de países en desarrollo tiene su disposición final en el medio ambiente sin ningún tratamiento. El Banco Mundial aún destaca que en América Latina cerca de tres cuartos del agua contaminada con coliformes fecales, regresan al cuerpo de agua, provocando graves problemas de salud pública y para el medio ambiente.

En este contexto, el objetivo general de este trabajo es evaluar y comparar las propiedades físico-mecánicas de bloques de concreto confeccionados con agua potable y bloques fabricados por con agua del efluente doméstico tratado por la ETE Vila União, localizada en Palmas - TO.

2. BLOQUE HUECO DE CONCRETO

La Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) define bloque hueco de concreto simple como “componente para la ejecución de albañilería, con o sin función estructural, hueco en las caras superior e inferior, cuya área líquida es igual ó inferior a 75% del área bruta” (ABNT NBR 6136:2014, p. 1).

En la producción de bloques de concreto es utilizado el concreto seco, también conocido como concreto sin asentar (MARCHIONI, 2012). Este concreto se diferencia del concreto convencional (plástico) en determinadas propiedades como: consumo de cemento, granulometría de las mezclas y trabal habilidad. La resistencia de los concretos secos no sigue al pie de la letra la Ley de Abrams, aplicado a los concretos plásticos. (FRASSON JR. e PRUDENCIO JR., 2002).

Entre las ventajas del uso de bloques huecos están el menor consumo de mortero en la ejecución de la albañilería; la posibilidad de ser llenados con barras de acero y lechada llegando a la capacidad de soportar cargas estructurales; y la utilización de sus cavidades para el paso de instalaciones eléctricas y sanitarias, que evita el corte en la albañilería, factor que contribuye para la reducción de residuos y para el aumento de la productividad.

Por tener tolerancias dimensionales muy bajas, generan una reducción en la aplicación del revestimiento en relación con el bloque cerámico (SANTOS, 2016). El bloque de concreto por presentar mayor adherencia, en relación con el bloque cerámico, exige menos revestimiento. Otra ventaja es en relación con la pérdida de material, teniendo en cuenta que los bloques de concreto no se quiebran tanto como los cerámicos (HOMETEKA, 2016).

3. PROCEDIMIENTO

Para el desarrollo de esa investigación fueron fabricados bloques de concreto con efluente tratado, tomado en el de julio de 2016, proveniente de la ETE Vila União, localizada en Palmas – Tocantins.

3.1. Recolección del efluente tratado

La recolección del efluente para el análisis químico fue realizada en el ETE Vila União, donde el tratamiento es realizado por reactores de flujo ascendente (UASB), lagos de lodo activado y decantadores. La recolección manual fue realizada con el dispositivo medidor de flujo enviado del efluente tratado de la estación.

El procedimiento referente al muestreo en aguas superficiales y recolección manual fue realizado según especificaciones de la NBR 9898:1987 y de la Guía Nacional de Recolección y Conservación de Muestras (2011) de la CETESB.

3.2. Análisis del efluente tratado

Los ensayos para evaluar el agua de reutilización fueron divididos en las siguientes etapas: evaluación preliminar, análisis químico, tiempo de pega de la pasta y resistencia a la compresión del mortero.

La etapa de evaluación preliminar estaba comprendida en la realización de los siguientes ensayos especificados en la Tabla 1, realizados en el Laboratorio de Química General de la Universidad Federal de Tocantins – UFT.

Tabla 1. Evaluación preliminar

Parámetro	Norma
Aceites y grasas	ABNT NBR 15900-3
Detergentes	
Cor	
Material sólido	
Olor	
Ácidos	
Materia orgánica	

As análisis químicas fueron realizadas pelo laboratorio MICROLAB Ambiental de Goiania – GO e contemplaran os ensayos y normas especificados en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis químico

Ensayo	Norma
Cloruros	ABNT NBR 15900-6
Sulfatos	ABNT NBR 15900-7
Álcalis	ABNT NBR 15900-9
Fosfatos	ABNT NBR 15900-8
Nitratos	ABNT NBR 15900-10
Azufre	ABNT NBR 15900-5
Zinc	ABNT NBR 15900-4

Según procedimientos de la NBR NM 45 y NBR NM 65 fueron realizados ensayos para la determinación de los tiempos de inicio y fin de pega de la pasta de cemento con efluente tratado. La norma de agua para mezclado de concreto (NBR 15900) indica que los tiempos de inicio y fin de pega de la pasta, en las muestras de pasta preparada con el agua en estudio, no deben diferir en más de 25% de los tiempos de inicio y final obtenidos con muestras preparadas con agua destilada. Los ensayos de resistencia a compresión fueron realizados a los 7 y 28 días de curado de las probetas de mortero, según los procedimientos de la NBR 7215. Según NBR 15900, la resistencia promedio, para las dos edades, debe llegar al menos a 90% de la resistencia a la compresión promedio de probetas preparadas con agua potable.

3.3. Fabricación de los bloques

La siguiente etapa fue la fabricación de los bloques huecos de concreto para albañilería de mampostería utilizando efluente tratado y agua potable. La Tabla 3 presenta la dosis utilizada en la fabricación de bloques.

Tabla 3. Dosis de concreto para la fabricación de los bloques

Dosis en peso (cem. : agregado : agua)	Material	Unidad	Cantidad
1 : 9,250 : 0,325	Cemento	Kg	40
	Agregado	Kg	370
	Agua	L	13

Para la fabricación de los bloques, se utilizó cemento CP II Z 32, fabricante CIPLAN, proveniente del mercado local (Palmas-TO). Los materiales utilizados en la mezcla del concreto con agua potable resultaron en un volumen de 0,17 m³ de concreto y la producción de aproximadamente 35

bloques. El mismo volumen de concreto con el efluente tratado fue producido, resultando en aproximadamente 35 bloques.

3.4. Ensayos para bloques

Fueron realizados los ensayos de análisis dimensional, absorción y área líquida en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Tocantins. Y el ensayo de resistencia a la compresión de bloques y prismas en el Laboratorio de Ingeniería Civil del Centro Universitario Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA – TO). Los procedimientos siguieron las normas NBR 6136 y NBR 12118.

El ensayo de resistencia a la compresión de prismas fue realizado según procedimientos de la norma NBR 15961. Según el referido procedimiento fueron adoptados prismas de dos bloques como uno de los elementos que pueden ser utilizados para estimar la resistencia a la compresión de paredes de albañilería estructural. A pesar de los bloques ser para albañilería de mampostería se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de prismas con dos bloques para obtener una mejor explicación para la transmisión de cargas de un bloque para otro.

La tabla 04 presenta la dosis en volumen y la relación agua/cemento del mortero utilizado para asentar los bloques en el montaje del prisma.

Tabla 4. Dosis en volumen del mortero

Dosis en volumen (cem. : arena)	Relación agua/cemento
1 : 0,5	1,4

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Evaluación preliminar del efluente

Luego de la recolección del efluente, fue realizada la evaluación preliminar del mismo con relación a los parámetros aceites, grasas, detergentes, color, material sólido, olor, ácidos y materia orgánica, de acuerdo con las recomendaciones normativas de la NBR 15900-1:2009. En esa evaluación los ensayos fueron hechos a partir de análisis cualitativos, con excepción del ensayo de material sólido que fue cuantificado el contenido presente en la muestra. En la Tabla 5 serán presentados los resultados obtenidos.

Tabla 5. Resultados da evaluación preliminar del efluente

Parámetro	Resultado	Requisito
Aceites y grasas	Sin dosis visibles	No más que la dosis visible
Detergentes	Presencia de espuma	Cualquier espuma debe desaparecer en 2 min
Color	Amarillo claro	El color debe ser comparado cualitativamente con agua potable debiendo ser amarillo claro o incoloro
Material sólido	391 mg/L	Máximo de 50.000 mg/L
Olor	Inodora y sin olor de sulfuro de hidrógeno posterior a la adición de ácido clorhídrico	Agua debe ser inodora y sin olor de sulfuro de hidrógeno, posterior a la adición de ácido clorhídrico
Ácidos	pH 8	pH ≥ 5
Materia orgánica	Solución de la muestra más clara que la solución-patrón	El color del agua debe ser más clara o igual a la solución-patrón, luego de la adición de NaOH

A pesar de que el agua de reutilización proveniente, de ETE no atender al parámetro “ausencia de espuma”, será permitido el uso del efluente tratado como agua de mezclado desde que sean atendidos los criterios sobre tiempo de pega y resistencia a la compresión presentados en el ítem 4.4 de la NBR 15900-1:2009.

Sobre los resultados presentados en la Tabla 5, el pH del efluente tratado presentó un resultado dentro de lo permitido y tenía coloración amarillo claro. Además de esto, el efluente en la prueba de olor presentó resultado inoloro y sin el olor de sulfuro de hidrógeno luego de la adición de ácido clorhídrico.

En relación con el parámetro “aceites y grasas” no fueron encontrados dosis visibles. También a través del análisis visual, en el parámetro “materia orgánica”, la solución de la muestra fue más clara que la solución-patrón. Y el contenido de material sólido fue inferior al contenido máximo.

4.2. Análisis químico del efluente

Ensayado químicamente, según las recomendaciones normativas presentadas en la Tabla 6, a fin de identificar la presencia o no de sustancias deletéreas al concreto, están cuantificados los contenidos de cloruros, sulfatos, álcalis, fosfatos, nitratos, azufre y zinc.

Tabla 6. Resultados del análisis químico

Sustancia	Contenido (mg/L)	Contenido máximo (mg/L)	Uso final	Método
Cloruros	75	500	Concreto pretensado o lechada	ABNT NBR 15900-6
		1.000	Concreto armado	
		4.500	Concreto simple (sin armadura)	
Sulfatos	64	2.000	-	ABNT NBR 15900-7
Álcalis	295	1.500		ABNT NBR 15900-9
Fosfatos	6,036	100		ABNT NBR 15900-8
Nitratos	0,02	500		ABNT NBR 15900-10
Azufre	<0.01	100		ABNT NBR 15900-5
Zinc	0,081	100		ABNT NBR 15900-4

Algunas sustancias, tomadas para Battagin (2010) como alteradoras de la resistencia a compresión y del tiempo de pega, fueron encontradas en niveles mínimos en la muestra de efluente. Para el autor nitratos de zinc, azufre y manganeso retardan la pega, mientras que nitratos de cromo promueven su aceleración. Al contrario, los fosfatos y boratos de azufre y zinc reducen la tasa de hidratación, prolongan el tiempo de pega y acortan la evolución de la resistencia inicial.

4.3. Tiempo de pega

Todavía en los ensayos previstos para agua de mezclado, fue realizado el ensayo de tiempo de pega, de acuerdo con la NBR 15900-1:2009. Según los criterios de la norma fue evaluada la aprobación o no del agua de reúso como insumo para la fabricación de los bloques. En la Figura 1 son presentados los tiempos de inicio y fin de pega de la pasta con agua destilada y con el efluente tratado.

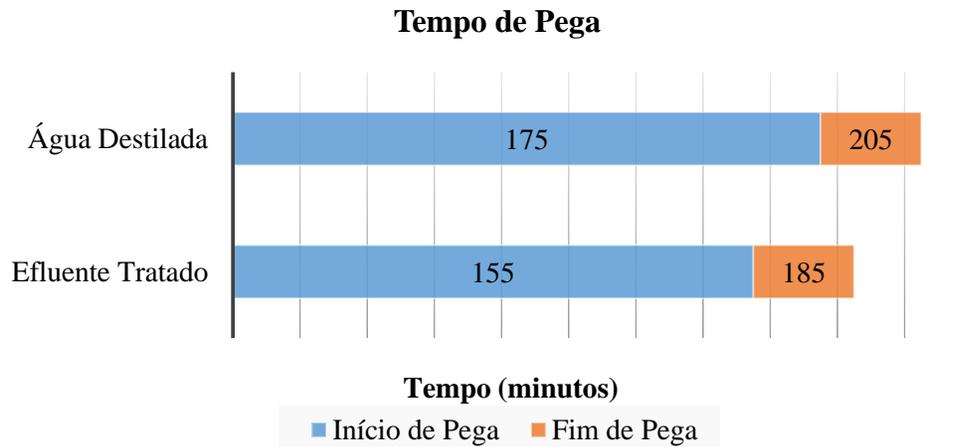


Figura 1. Resultados referentes a los tiempos de inicio y fin de pega

Se aprecia que los tiempos de inicio y fin de pega de las muestras de pasta preparadas con efluente tratado, no divergen en más de 25% de las producidas con agua destilada, atendiendo a lo exigido por la NBR 15900-1:2009. El efluente difiere en 11,43% para el inicio de pega, y 9,76% para el fin de pega.

4.4. Resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión axial del mortero fueron utilizadas 4 probetas de prueba de cada muestra a los 7 y 28 días de edad, en un total de 16 probetas de prueba Ensayados. Los resultados son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Resistencia a la compresión de la probeta de mortero

Resistencia a la compresión (MPa)				
Probeta	Agua destilada		Efluente Tratado	
	7 días	28 días	7 días	28 días
1	18,90	24,69	16,68	24,04
2	15,65	21,82	19,87	19,49
3	19,00	24,69	17,00	22,20
4	19,17	26,26	16,79	22,74
Promedio	18,18	24,37	17,59	22,12
D.P.	1,69	1,85	1,53	1,91
C.V. (%)	9,30%	7,60%	8,70%	8,66%

La resistencia promedio a la compresión de las probetas de mortero con efluente tratado, a los 7 días y 28 días, alcanzó más de 90% de la resistencia a la compresión promedio de las probetas preparadas con agua destilada, atendiendo a lo exigido por la NBR 15900-1:2009. A los 7 días se llegó al 96,75%, y a los 28 días se llegó 90,77%.

Por medio de la hipótesis “t” de Student, se comprobó que la resistencia promedio del mortero con agua destilada y del mortero con efluente tratado tuvieron entre sí, valores significativamente semejantes, para un nivel de confianza de 95%.

4.5. Absorción y área líquida de los bloques

Fueron utilizados tres bloques para cada muestra (Bloque A y B). El resultado de la determinación de la absorción y área líquida de los bloques convencionales pueden ser visualizados en la Tabla 8.

Tabla 8. Determinación de la absorción y área líquida de los bloques convencionales

Probeta	Absorción		Área líquida	
	Individual (%)	Promedio (%)	Individual (mm ²)	Promedio (mm ²)
1	10,71%	10,50%	25.000,00	25.000,00
2	10,26%		24.736,84	
3	10,53%		25.263,16	

La Tabla 9 muestra los resultados de la determinación de la absorción y área líquida de los bloques con efluente tratado.

Tabla 9. Determinación de la absorción y área líquida de los bloques con efluente tratado

Probeta	Absorción		Área líquida	
	Individual	Promedio	Individual (mm ²)	Promedio (mm ²)
1	10,48%	10,66%	26.052,63	25.789,47
2	10,68%		25.789,47	
3	10,84%		25.526,32	

El requisito de la NBR 6136:2014 para el ensayo de absorción en bloques, con uso de agregado normal, y de absorción individual menor o igual a 12% y absorción promedio menor o igual a 10%. Los resultados muestran que ambas muestras de bloques presentaron absorción promedio superior al límite máximo a los 28 días de curado. Para Fernandes (2012), un bloque producido con cantidad de agua insuficiente para la perfecta compactación o producido con composición granulométrica muy gruesa generalmente presenta una superficie porosa, sujeta a absorber agua con facilidad. En vista que la distribución granulométrica utilizada para la confección de los bloques permite un buen acabado de las piezas, se cree que probablemente la cantidad de agua adicionada en la mezcla no fue suficiente para producir piezas con poca porosidad, mediante el grado de compactación utilizado. El alto contenido de materiales pulverizados puede haber aumentado el consumo de agua debido a la alta superficie específica de finos.

4.6. Ensayo de resistencia a la compresión de los bloques

Para el ensayo de resistencia a la compresión axial, fueron utilizados 6 bloques de cada muestra (convencional y efluente tratado) a los 14 y 28 días de edad, en un total de 24 bloques Ensayados. Los resultados son presentados en la Tabla 10, y muestran el comparativo entre las resistencias promedios de las muestras.

Tabla 10. Resultado de la resistencia a la compresión

Resistencia a la compresión (MPa)				
Bloque	Convencional		Efluente Tratado	
	14 días	28 días	14 días	28 días
1	2,28	3,16	3,61	3,58
2	1,87	3,43	3,04	5,03
3	2,03	3,26	3,11	4,20
4	2,53	3,17	3,00	3,53
5	2,43	3,09	4,96	3,54
6	2,40	3,09	2,05	4,80
Promedio	2,26	3,20	3,29	4,11
D.P.	0,26	0,13	0,96	0,67
C.V. (%)	11,30%	4,05%	29,19%	16,40%

La resistencia promedio a compresión de las probetas de mortero con efluente tratado, a los 7 días y 28 días, alcanzó más de 90% de la resistencia a compresión promedio de las probetas preparadas con agua destilada, atendiendo lo exigido por la NBR 15900-1:2009. A los 7 días el alcance de la resistencia fue de 96,75%, y con 28 días de 90,77%, presentando entre si valores significativamente semejantes, para un nivel de confianza de 95%.

Para la clasificación de los bloques en cuanto a su debida clase se debe tomar como referencia la resistencia a la compresión característica estimada ($F_{bk,est}$). Los valores del $F_{bk,est}^a$ del bloque convencional y del bloque con efluente tratado están presentados en las Tablas 11 y 12, respectivamente.

Tabla 11. Resultado de la resistencia a la compresión de los bloques convencionales

Probeta	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistencia a compresión (MPa)		$F_{bk,est}^a$	F_{bk}^b
		Individual	Promedio		
1	17.584	3,16	3,20	3,03	3,03
2	19.122	3,43			
3	18.154	3,26			
4	17.640	3,17			
5	17.222	3,09			
6	17.224	3,09			

^a Resistencia a la compresión característica estimada de la muestra expresado en MPa
^b Resistencia característica a la compresión expresado en MPa ($F_{bk,est} \geq \Psi \cdot F_{b1}$)

Fuente: Autor, 2016

Tabla 4. Resultado de la resistencia a la compresión de los bloques con efluente tratado

Probeta	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistencia a la compresión (MPa)		F _{bk,est} ^a	F _{bk} ^b
		Individual	Promedio		
1	19.937	3,58	4,11	3,49	3,49
2	27.994	5,03			
3	23.406	4,20			
4	19.646	3,53			
5	19.709	3,54			
6	26.745	4,80			

^a Resistencia a compresión característica estimada de la muestra expresado en MPa
^b Resistencia característica a compresión expresado en MPa ($F_{bk,est} \geq \Psi \cdot F_{b1}$)

Fuente: Autor, 2016

Ambas muestras de bloques atendieron las especificaciones de resistencia para bloques de la Clase C, Fbk mayor o igual a 3 MPa especificados en el ítem 6.5 de la NBR 6136:2014.

Os bloques hechos con efluente tratado presentaron resistencia promedio y resistencia característica mayor que los bloques producidos con agua potable, con ganancia de resistencia a la compresión para un nivel de confianza de 95%.

Tomando en cuenta que el proceso de fabricación, la dosis y el curado fueron los mismos para las dos muestras, entonces se cree que ese aumento de resistencia se dio debido a algún problema en el vaciado de los bloques (realizado en la fábrica), en vista que en el ensayo de resistencia a compresión del mortero el resultado fue diferente.

Los bloques con efluente presentaron mayor compacidad (cohesión de las partículas) y mayores resistencias. En la Tabla 13, se puede comprobar que la muestra de bloques con efluente tratado presentó mayor densidad que los bloques de la otra muestra.

Tabla 13. Densidad de los bloques

Peso (kg)	Volumen (m ³)	Densidad (Kg/m ³)	Densidad Promedio (Kg/m ³)
Bloques convencionales			
9,80	0,00480	2041,67	2017,36
9,75		2031,25	
9,50		1979,17	
Bloques con efluente tratado			
10,50	0,00480	2187,50	2149,31
10,30		2145,83	
10,15		2114,58	

Fuente: Autor, 2016

Fernandes (2014) afirma que para un mejor control tecnológico se recomienda establecer la pieza deseada, y obtener su peso adoptando como patrón en un rango de variación de no más de 5%, por encima o por debajo. El establecimiento del peso patrón para las piezas y el control de peso luego de la extrusión el método más eficiente es practicado para control del desvío patrón de la resistencia, sea en diferentes lotes, o entre ciclos de una misma mezcla ó hasta entre piezas de la misma bandeja.

4.7. Resistencia a la compresión de prismas

El ensayo de resistencia a la compresión simple realizado con prismas de 3 bloques de cada muestra con 28 días, totalizando 6 prismas sin mortero, presentó valores de resistencia a compresión y valores de factor de eficiencia prisma/bloque detallados en la Tabla 11.

Tabla 11. Resistencia a compresión simple de los prismas

Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Eficiencia (f _{pm} /f _{bm})
Prisma Convencional					
11.687	2,10	2,30	0,37	16,01%	71,97%
11.600	2,08				
15.199	2,73				
Prisma con efluente tratado					
16.012	2,88	3,15	0,25	7,94%	76,47%
17.779	3,19				
18.755	3,37				

Se observó en todos los prismas, que la ruptura ocurrió por tracción en el bloque, causando fisuración vertical, iniciada e intensificada en las paredes longitudinales y algunas veces en las paredes transversales. Las líneas rojas presentadas en la Figura 3 demarcan las fisuras en los prismas.



Figura 3. Ruptura típica de los prismas

La eficiencia es convencionalmente definida como la relación entre la resistencia de un elemento, por ejemplo, un prisma, y la resistencia del bloque que lo compone. Según Ramalho y Correa (2003), el factor de eficiencia f_{pm}/f_{bm} varía de 0,50 a 0,90. Para las dos muestras fueron encontrados valores sobre 0,70 de eficiencia prisma/bloque, estadísticamente semejante por la prueba de hipótesis “t” de Student, para un nivel de confianza de 95%.

5. CONCLUSIONES

Os resultados del análisis de agua de reusó y los datos de resistencia a la compresión, inicio y final de pega, pueden confirmar la no interferencia del uso del efluente en la composición de los bloques. Todos los resultados atendieron a los criterios de tiempo de pega y resistencia a compresión para agua de mezclado para concreto establecidos por la NBR 15900-1:2009.

En cuanto a las verificaciones dimensionales de los bloques vaciados, se verificó que las áreas líquidas promedios de las dos muestras de bloques presentaron porcentual alrededor de 45% del área bruta del bloque, atendiendo a los requisitos de valores menores que 75%, exigido por la NBR 6136:2014. Ambas muestras presentaron aspectos dimensionales semejantes estadísticamente, no interfiriendo el efluente en la estabilidad dimensional de las piezas.

Sobre la absorción de los bloques, los resultados promedios obtenidos para las dos muestras fueron por encima del límite máximo presentado por norma. El alto contenido de materiales pulverulentos debe haber aumentado el consumo de agua, haciendo que la cantidad de agua fuese insuficiente para mezclar y consecuentemente formar un concreto poroso.

6. REFERENCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996), *NBR 7215: 1996, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987), *NBR 9898: 1987, Preservação e técnicas de amostragem de afluente líquidos e corpos receptores – Procedimento*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), *NBR NM 45:2006, Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-1:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 1: requisitos*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-2:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 2: coleta de amostras para ensaios*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-3:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 3: avaliação preliminar*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-4:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 4: análise química – Determinação de zinco solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-5:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 5: análise química – Determinação de chumbo solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-6:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 6: análise química – Determinação de cloreto solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-7:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 7: análise química – Determinação de sulfato solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-8:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 8: análise química – Determinação de fosfato solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-9:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 9: análise química – Determinação de álcalis solúveis em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-10:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 10: análise química – Determinação de nitrato solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-11:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 11: análise química – Determinação de açúcar solúvel em água*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), *NBR 15961-1:2011, Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: projeto*. Rio de Janeiro.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), *NBR 15961-2:2011, Alvenaria estrutural — Blocos de concreto – Parte 2: execução e controle de obras*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 6136:2014, Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), *NBR 12118:2013, Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.
- AMN - Asociación Mercosur de Normalización (2002), *NM 65:2002, Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro.
- Frasson Jr, A.; Oliveira, A. L.; Prudêncio Jr., L. R. (2002), *Influência do processo produtivo nas resistências dos blocos de concreto*. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, PR, maio, 8 p.
- CETESB - ANA (2011), *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Agência Nacional de Águas, Organizadores: Carlos Jesus Brandão [et al.], Autores: Adriana Castilho R. de Deus [et al.], São Paulo; Brasília.
- Hometeka, *Bloco de concreto x bloco cerâmico na alvenaria estrutural*. Disponível em: <http://goo.gl/zqavdD>. Acesso em: 01 set. 2016.
- Marchioni, M. L. (2012), “*Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada*”, 111 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.
- da Silva Battagin, I. L. (2010), “*A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto: uma contribuição para a sustentabilidade*”, *Concreto & Construção*, São Paulo, v. 58, p.37-45, abr.-jun. 2010. Disponível em: <http://goo.gl/F4xWZb>, Acesso em: 01 set. 2016.
- Ramalho, M. A.; Corrêa, M. R. S. (2003), “*Projeto de edifícios de alvenaria estrutural*”, 1 ed. São Paulo: PINI.
- SANTOS, A. (2011), *Bloco de concreto começa a virar o jogo*. Disponível em: <http://goo.gl/d9LP02>, Acesso em: 01 set. 2016.
- Visvanathan, C., Asano, T. (2001), *The Potential for Industrial Wastewater Reuse*. Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO Publication. Disponível em: <http://goo.gl/HDq4TH>, Acesso em: 01 set. 2016.
- World Bank (2015), *Brasil, Colômbia e Peru lideram lista de países com mais água no mundo*. Disponível em: <http://goo.gl/F3j1AC>, Acesso em: 01 abr. 2016.

Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención

J. L. Guevara^{1*} , Y. A. Toirac¹ , C. M. C. Marisy¹ 

*Autor de Contacto: jlopezg@civil.cujae.edu.cu

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>

Recepción: 26/10/2017 | Aceptación: 29/05/2018 | Publicación: 30/04/2019

RESUMEN

La armadura del Coro alto del Convento de Santa Clara de Asís ha sido víctima de la humedad, y del ataque de agentes bióticos y abióticos que han provocado su paulatina degradación. Para la identificación de los procesos patológicos asociados a estos agentes y por su carácter patrimonial se realizó un estudio de diagnóstico basado en una inspección organoléptica y en ensayos superficiales con el instrumental disponible, que permitieron identificar las causas. Mediante la modelación de la estructura en el programa SAP 2000 se obtuvieron las solicitaciones a las que se encuentran sometidos los elementos a intervenir y con el resultado se calcularon las soluciones propuestas para las patologías identificadas, fundamentalmente para la pérdida del vínculo entre la solera y el tirante.

Palabras clave: procesos patológicos; carácter patrimonial; inspección organoléptica; ensayos superficiales; modelación.

Citar como: 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), pp. 228 – 246, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echevarría, La Habana, Cuba

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

An approach to the convent of Santa Clara de Asís in Havana. Study of its conservation status and intervention proposals

ABSTRACT

Santa Clara de Asis Convent High Choir timber truss has been victim of humidity and attack of abiotic and biotic agents which have caused its gradual degradation. For the identification of pathological processes associated with these agents and because of its patrimonial character, a diagnosis study based on an organoleptic inspection and superficial tests was carried out with the available instruments, which allowed identifying the causes. By modeling the structure with SAP 2000 program, we obtained the results that were used to calculate the solutions proposed for the identified pathologies, mainly for the loss of connection between the wall plate and the tie rod beam.

Keywords: pathological processes; patrimonial character; organoleptic inspection; superficial tests; modeling.

Inspeção ao convento de Santa Clara de Asís em Havana. Estudo do seu estado de conservação e propostas de intervenção

RESUMO

As treliças do Coro alto do Convento de Santa Clara de Assis têm sido vítimas da umidade, do ataque de agentes bióticos e abióticos que causaram sua degradação gradual. Para a identificação dos processos patológicos associados a esses agentes e pelo seu caráter patrimonial, foi realizado um estudo diagnóstico baseado em inspeção organoléptica e ensaios superficiais com os instrumentos disponíveis, que permitiram identificar o problema e fazer um diagnóstico. Modelando a estrutura no programa SAP 2000, foram encontradas as solicitações as quais os elementos estruturais estão submetidos. Com isso foi proposta a solução dos problemas patológicos, principalmente a intervenção para corrigir a perda do vínculo entre a viga e o tirante. **Palavras-chave:** processos patológicos; caráter patrimonial; inspeção organoléptica; ensaios superficiais; modelar.

1. INTRODUCCIÓN

En La Habana ha comenzado un proyecto de rescate del convento Santa Clara de Asís de La Habana Vieja, para poder vincular el pasado, el presente y el futuro de esta longeva edificación, mediante un proceso de conservación, preservación y rehabilitación, del patrimonio heredado por la humanidad, de modo que éste se integre a la vida contemporánea.

El convento ubicado en el Centro Histórico de la capital cubana, con su Coro alto como se observa en la “Figura 1”, fue a decir de Pedro Herrera “la primera estructura no militar de escala monumental que se construyó en La Habana, por lo que el escenario urbano de la vieja villa experimentó una definitiva transformación” (López, 2006).



Figura 1. Iglesia del convento de Santa Clara, al fondo el Coro alto.

Las armaduras de pares del primer claustro del convento de Santa Clara son consideradas las más antiguas conservadas en La Habana Vieja y en cuanto a este tipo de techos, el mejor exponente por sus disímiles soluciones. Estas estructuras por su composición han estado expuestas al ataque de agentes externos, ya sean bióticos o abióticos que actúan de manera agresiva provocando su degradación.

Con la siguiente investigación se realiza un estudio del estado actual de deterioro que presenta la armadura del Coro alto del convento y se dan las propuestas de técnicas de intervención, ya sean tradicionales o actuales, dirigidas a recuperar y mejorar la capacidad estructural de las armaduras de maderas del convento de Santa Clara de Asís, siendo una obra del siglo XVII y considerado Patrimonio Cultural de la Humanidad con grado de protección 1, otorgado por las regulaciones urbanas de La Habana Vieja. Este sistema constructivo representa una herencia valiosa; conservarlo posibilita el rescate de la identidad cultural de la nación.

2. EL CONVENTO DE SANTA CLARA DE ASÍS, EXPONENTE DE LAS ARMADURAS DE MADERA MÁS ANTIGUAS CONSERVADAS EN LA HABANA VIEJA

En su artículo *Las armaduras de pares en La Habana Vieja. El privilegio de su conservación*, la Dra. Felicia Chateloin afirma que “puede considerarse que el convento de Santa Clara es el ejemplo más importante de construcción habanera en que se hayan empleado las armaduras de pares. Su estudio es importante, no solo por la antigüedad, la calidad y la variedad de sus techos, sino también por el número, no igualado por ninguna otra edificación” (Santiesteban, 2007).

En el primer claustro son notables, “los techos artesonados que cubren la mayoría de los recintos en su planta alta, y se destacan por la elegancia de proporciones, así como la talla de sus principales elementos, los de la nave de la iglesia y su coro” (Espiniella, 2001; Arduengo and Cruz, 2012).

En Cuba, la mayor parte de los techos de madera inclinados de la etapa colonial, son descendientes de las armaduras de origen mudéjar. Por mucho tiempo autores como Joaquín Weiss (Weiss, 1978) se refirieron a este tipo de armaduras como alfarjes, pero Felicia Chateloin llama la atención sobre el error al emplear este término en las armaduras de pares, “hoy reconocemos que este término debe restringirse a los techos planos decorados, deben ser denominados correctamente ‘armadura de pares’ por su sistema estructural. Fueron las armaduras de pares, y no los alfarjes, los que caracterizaron los techos de La Habana colonial de los siglos XVII y XVIII” (Santiesteban, 2007).

2.1 Caracterización constructiva y estructural de la armadura del Coro alto de la iglesia

El techo del coro alto está formado por pares o alfaridas, ver “Figura 2”, en serie de dúos, que parten del estribo, marco perimetral de la estructura, y llegan a la viga hilera o cumbrera conformando cuatro faldones. Según el criterio de especialistas (Santiesteban, 2007), en locales con luces mayores de 10 m los pares tendrán una sección aproximada de 14 x 17 cm. Las alfaridas se encuentran unidas horizontalmente, a dos tercios de la altura, por los nudillos quedando determinado el harneruelo, con lo que el perímetro interior del techo es un trapecio. Por ésta última característica se puede clasificar como una armadura de par y nudillo y como conjunto estructural trabaja a compresión. “En estos techos la hilera no está a la vista y puede o no apoyarse en limas. El nudillo tiene una sección de dimensiones iguales o muy semejantes a las del par de su armadura” (Santiesteban, 2007).



Figura 2. Elementos estructurales de la armadura del Coro alto del convento.

Los pares se apoyan en los muros por medio del estribo, marco estructural del sistema, en templos religiosos su sección puede ser de 35 x 30 cm o más, es el encargado de recibir los empujes horizontales que transmiten los pares (Santiesteban, 2007). Para rigidizar la estructura, el estribo se traba con vigas transversales o ‘tirantes’ que trabajan a tracción y conforman un triángulo conjuntamente con los pares, estas vigas de sección 15 x 20 cm aproximadamente se encuentran unidas por cortas piezas denominadas ligaduras constituyendo lo que se denomina tirantes pareados, ver “Figura 3”, en el espacio entre ellas y a la mitad de la luz presenta un polígono estrellado con función decorativa. El objetivo de los tirantes pareados generalmente es realizar el empate de las soleras que están constituidas por tramos.



Figura 3. Tirantes pareados sobre canes.

En los ángulos del local, en la “Figura 4”, se observan los ‘cuadrales’, los que se ensamblan al estribo, tienen función rigidizadora y al igual que los tirantes trabajan a tracción (Santiesteban, 2007). Los cuadrales se disponen a 45° apoyados sobre canes en esviaje (Matauco, 2000). Los canes en que se apoyan los cuadrales se encuentran tallados paralelamente a los muros contiguos, lo que hace los frentes más visibles.

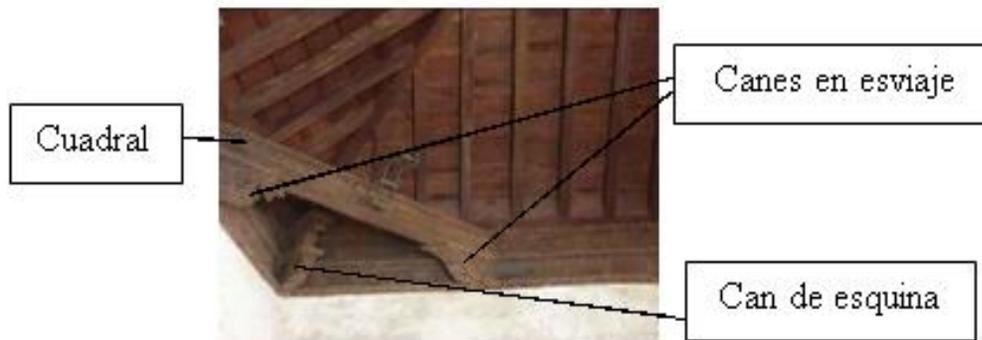


Figura 4. Cuadral, canes en esviaje y can de esquina.

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO PARA EL DIAGNÓSTICO

La metodología llevada a cabo para el estudio de las patologías en la armadura se realizó a partir del estudio de metodologías propuestas por diferentes autores (Álvarez et al., 2005); (Basterra et al., 2005); (Garófalo, 2000); (Otaño, 2002); (Rodríguez, 2006). “Un análisis integral del problema, abarcará siempre el examen del ambiente próximo a la edificación, las lesiones y sus manifestaciones deformativas y su incidencia casuística. La conservación o protección necesaria va desde el edificio a la ciudad y de ésta a aquél, como todo proceso que funciona como un sistema” (Otaño, 2002).

La metodología de diagnóstico que definen estos autores consta de tres etapas fundamentales, primera: caracterización del objeto de estudio, segunda: inspección organoléptica y tercera: exámenes superficiales. En la primera etapa se realiza un primer acercamiento a la obra, búsqueda y revisión bibliográfica para recopilar información sobre los antecedentes del conjunto edilicio, características del sistema y sus componentes. La segunda etapa consiste en el reconocimiento del inmueble y su entorno, basado en una inspección organoléptica rigurosa y detallada que permita establecer el estado general de conservación de la estructura; la inspección se apoyará de croquis en el que se trazaron ejes de coordenadas con el objetivo de delimitar mejor las áreas del local y facilitar la posterior descripción y representación de las patologías identificadas. Estará acompañado además de una documentación fotográfica de modo que evidencie la patología a la que se hace referencia. En la tercera etapa se definen las técnicas e instrumentos para la realización de ensayos no destructivos que permitan realizar un análisis más detallado de los procesos patológicos que se están dando lugar en la estructura. En esta etapa se evalúan los parámetros ambientales que puedan influir sobre las patologías observadas, se realizan ensayos in situ como la medida de humedad ambiental, superficial de los elementos y temperatura, en el laboratorio se realiza la identificación anatómica de las especies y de organismos xilófagos. Este diagnóstico final se realiza con el objetivo de confirmar o rechazar las hipótesis elaboradas en la segunda etapa.

Para la realización del diagnóstico se muestran en los croquis de la “Figura 5” la numeración de los elementos que conforman la estructura del Coro alto. La enumeración de los pares se realizó de forma independiente en cada faldón; mientras que los componentes de la tablazón, se definieron en función de la junta que le correspondía en cada caso y se contó a partir del arranque de la armadura sobre los muros en dirección a la cumbre. Los canes, cuadrales, limas y vigas del tirante (elementos que se pueden observar en la “Figuras 6”) se enumeraron de forma consecutiva comenzando por los elementos ubicados en la intersección de los ejes B'-1, y en el sentido de rotación de las manecillas del reloj, ver “Figura 5”.

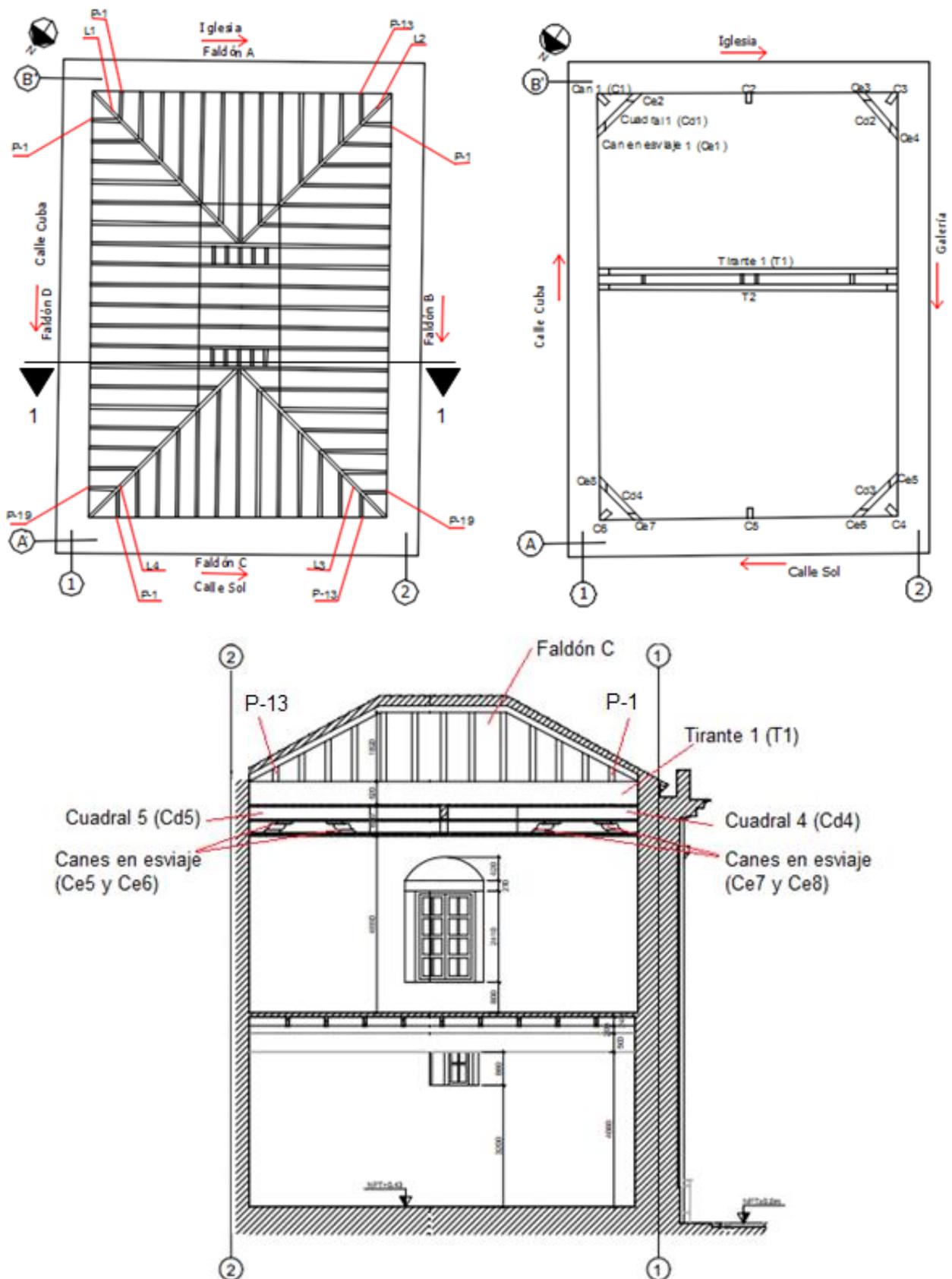


Figura 5. Nomenclatura y numeración de los elementos del Coro alto en planta arquitectónica y en corte transversal 1-1.

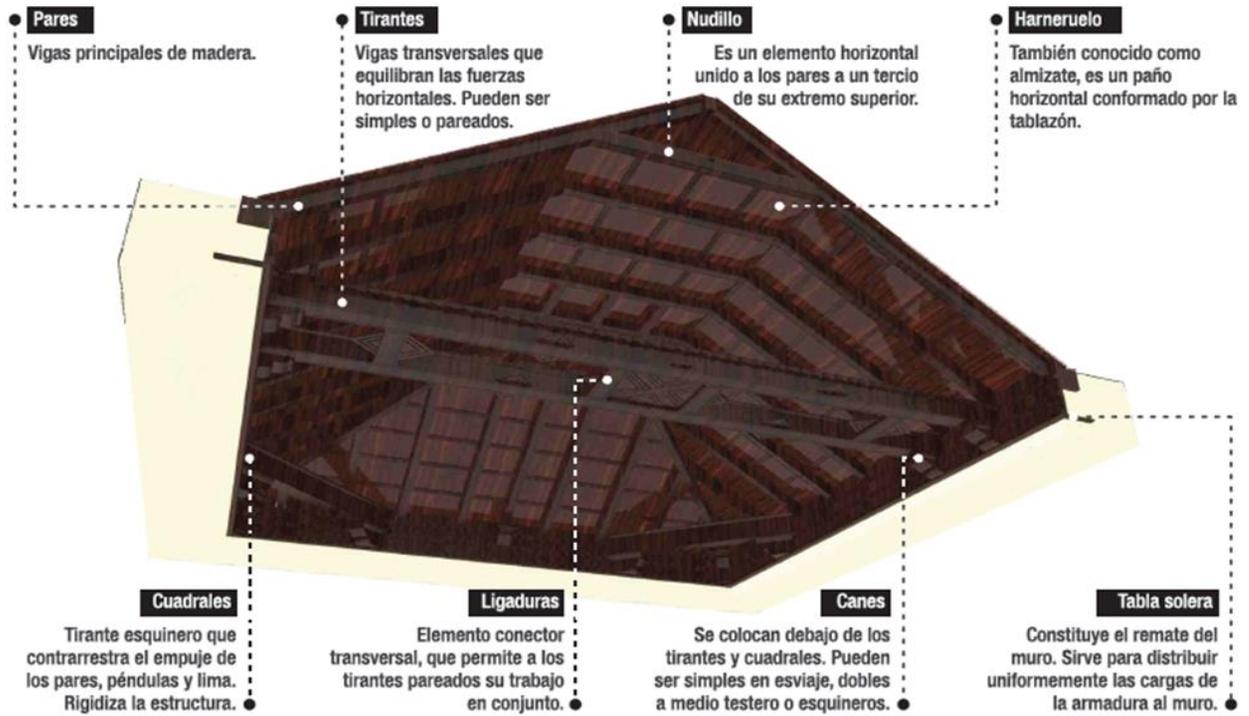


Figura 6. Elementos componentes de la armadura de par y nudillo del Coro alto. (Autores: Arq. Dayana Espinosa Ruiz; Arq. Lillian Potts Rodríguez y Arq. Linnet Valdés Rivero)

3.1 Inspección visual del Coro alto

El primer acercamiento a la estructura mostró el evidente abandono a que está sometida y el nivel de deterioro por la ausencia de mantenimiento. Se aprecia suciedad en los muros como consecuencia de la acumulación de polvo, hollín y materia orgánica producto de la cercanía a la Avenida del Puerto y el paso de vehículos automotores por las calles aledañas.

Se percibe en el local una humedad ambiental elevada. Por otro lado, se comprobó que la edificación ha estado expuesta por períodos prolongados a exceso de agua, debido a filtraciones provenientes de la cubierta, que se evidencia por las pátinas verdes y manchas de escorrentía en los muros ver “Figuras 7-10”. Estas filtraciones pueden causar daños severos en la madera, acelerando el proceso de putrefacción y en los muros de tapiales, debido a que por su propia constitución tienden a retener mucha humedad.



Figura 7 y Figura 8. Pátinas en muro de galería a eje 2 del Coro.



Figura 9. Muro en eje A con escorrentía.



Figura 10. Pátinas verdes bajo arrocabe en el eje 2.

Debido a la proliferación de plantas hospederas en la cubierta, se vislumbran sistemas desarrollados de raíces que penetran hasta los muros de tapiales, ver “Figura 11”, y pueden influir en la fisuración de estos.



Figura 11. Raíces en eje A de plantas hospederas en la cubierta.

Los grupos de murciélagos que se encuentran en el techo del local, ver “Figura 12”, han colaborado con sus excrementos y restos de alimentos a la suciedad de los muros y el local en general, ver “Figura 13”. Aunque la actuación de estos quirópteros en algunas situaciones es beneficiosa para el hombre, como el mantenimiento y regeneración de bosques al tener un importante papel en la dispersión de semillas, pueden llegar a convertirse en una plaga cuando se instalan en lugares que no constituyen su hábitat natural.

La deposición de los murciélagos contiene ácidos que producen en los muros problemas de naturaleza estética, por la acumulación de excrementos negros. Además, pueden afectar la salud humana al crear un ambiente propicio para el desarrollo de toda una sucesión ecológica de microorganismos, comenzando con el crecimiento de bacterias, hongos y finalmente la proliferación de insectos xilófagos.



Figura 12. Presencia de murciélagos.



Figura 13. Suciedad en los muros producto de los excrementos de murciélagos y en el local producto de restos de sus alimentos.

Se observan fisuras y grietas verticales, que oscilan entre 1-2 cm de espesor y una profundidad de 3-4 cm, sobre todo en las uniones entre muros, ver “Figura 14”. Estas grietas pueden ser consecuencia de un desplome, provocado por el empuje de la armadura, ya que se muestran también grietas horizontales en la parte baja del muro, ver “Figura 15”.



Figura 14. Grieta de 2 cm de ancho en intersección de ejes A-1.



Figura 15. Grietas horizontales en la parte baja de muro (eje 1).

Por ser un material de origen orgánico, la madera está expuesta al ataque de diferentes agentes, tanto bióticos como abióticos que influyen en su degradación y la pérdida de su resistencia en la mayoría de los casos. Los agentes abióticos, son del tipo físico y/o químico y están causados por fenómenos climáticos o meteorológicos como la radiación solar, la humedad ambiental, la lluvia, el viento, entre otras (Colectivo de autores, 1998).

Según la Corporación Chilena de la Madera (CORMA) para el desarrollo y subsistencia de los agentes biológicos se requiere de ciertas condiciones, como la existencia de fuente de material alimenticio para nutrirse, un intervalo de temperatura ideal para su desarrollo entre 3° a 50°C, siendo óptimo alrededor de los 37°C. Para que la madera sea susceptible al ataque de hongos la humedad debe oscilar entre el 20% y el 140%, pues por debajo del 20%, el hongo no puede desarrollarse y por encima del 140% de humedad, no existe el suficiente oxígeno para que pueda vivir. Con las condiciones anteriormente descritas, la madera está expuesta al ataque biológico, pudiendo producirse alteraciones de importancia en la resistencia mecánica de la madera o en su aspecto exterior.

La unión entre el tirante y la solera es el punto más crítico, pues su mal funcionamiento trae desajustes al techo y la entrada de agua (Garófalo, 2000; Rodríguez, 2003). En ocasiones, se producen empujes en el muro provocados por el tirante desprendido, dando lugar a grietas horizontales que surgen a determinada altura, más visibles en la cara interior, acompañado de un

desplazamiento hacia afuera de las hiladas más altas. En las imágenes, ver “Figuras 16-19”, se muestra el descenso de los canes en que apoyan los tirantes y cuadrales, la causa de este deterioro puede estar asociada a la presencia de humedad que condicionó la pudrición de los elementos de apoyo ubicados en el interior del muro por lo que los elementos dejaron de trabajar como originalmente lo hacían y comenzaron a ceder. En el caso de los canes en que apoyan los tirantes, puede estar asociado, además, a la fuerza que le están ejerciendo los tirantes.



Figura 16. Descenso de can bajo el tirante 2 (T2), en eje 2.



Figura 17. Descenso de canes bajo tirante 1 y 2 (T1 y T2), en eje 1.



Figura 18 y Figura 19. Descenso de canes en esviaje (Ce7 y Ce8) bajo cuadrado 4 (Cd4).

3.2 Examen superficial de la armadura del coro alto

Se contó con el apoyo del Grupo de Diagnóstico de la Oficina del Historiador para la realización de ensayos de nivel I y II (Rodríguez, 2006) que complementaron el estudio organoléptico realizado y permitió un mayor acercamiento al estado real de conservación de la estructura. Como parte de este estudio se realizaron los siguientes ensayos: medición de las dimensiones de los elementos que conforman el techo (nivel I), medición de humedad superficial, temperatura y humedad ambiental (nivel I), sondeo con punzón de los elementos de madera (nivel I), identificación de plantas superiores (nivel I) e identificación anatómica de la madera (nivel II) (laboratorio).

Dimensionamiento de los elementos.

Para determinar las escuadrías de los pares que conforman la armadura y el espaciamiento entre ellos, ya que no se tienen los planos originales, se empleó una lienza como elemento de medición. Las mediciones se realizaron en la cara lateral y en la inferior de los elementos. La medida del espaciamiento se realizó de cara a cara interna de los pares. El esquema de las medidas tomadas a estos elementos se muestra en la “Figura 20”.

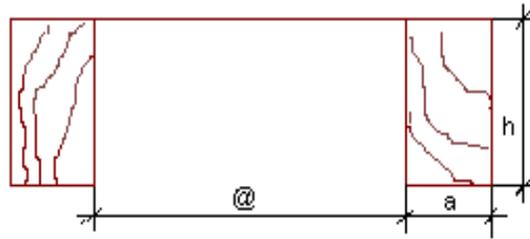


Figura 20. Forma de medición de los pares.

En la Tabla 1 se muestra la cantidad de elementos que contiene la armadura, así como los rangos en que oscilan las dimensiones de las secciones transversales según el tipo de pieza y su espaciamiento.

Tabla 1. Dimensionamiento de los elementos de la armadura del Coro alto.

Elemento	Cantidad	Secciones		Espaciamiento (@)
		Ancho (a)	Peralto (h)	
Limas	4	17 cm	20-22 cm	-
Pares	64	17 cm	20-22 cm	45-58 cm
Cuadrales	4	23-24 cm	30-31 cm	-
Canes	10	-	-	-
Canes en esviaje	8	-	-	-
Tirantes simples	2	T1	24.5 cm	31.5 cm
		T2	22.5 cm	

Humedad relativa y temperatura ambiental.

Los valores de humedad relativa se midieron con el termo-higrómetro, ver “Figura 21”, se hicieron lecturas en diferentes puntos del local controlados durante tres meses (marzo-mayo de 2018) de forma que se pudiera obtener las posibles variaciones en las lecturas realizadas que evidencie diferencias atmosféricas dentro del mismo local. Los valores medidos en todos los casos son superiores al 65% y las condiciones termohigrométricas son convenientes, es decir, existen en el local temperaturas comprendidas entre 20°C y 30°C, las que favorecen el desarrollo de agentes de biodegradación y contribuye a acelerar los ciclos vitales de numerosos microorganismos e insectos xilófagos degradadores de la madera.

Humedad superficial.

El ensayo de humedad superficial permite conocer el contenido de humedad retenido en las fibras del material, ya que su valor influye en las propiedades físicas del mismo. Para la ejecución del ensayo se empleó como instrumento el Higrómetro *Protimeter Surveymaster SM*, ver “Figuras 22 y 23”.



Figura 21. Termo-higrómetro.



Figura 22. Higrómetro *Protimeter Surveymaster SM*.



Figura 23. Medición de humedad superficial en elementos.

El instrumento posee dos modos de medición: por el color de la barra LED y por la lectura del porcentaje (%) de humedad contenido en la madera. Según el color en la barra, será verde cuando está en un estado seguro de secado al aire, amarilla representa la frontera y roja cuando la madera se encuentra en una condición desfavorable. La clasificación de los niveles de saturación establecida por el fabricante se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de saturación establecidos por el fabricante.

Color	Nivel de saturación de humedad superficial	Rango de valores (%)
Verde (V)	Semi seco	6-8-10
Amarillo (A)	Humedad admisible	12-14
Rojo (R)	Húmedo	16-18-20
	Saturado	= 20

Las mediciones se realizaron en los pares, en las zonas próximas al apoyo y en los elementos que se observaban más expuestos a la humedad, registrándose cinco lecturas en cada medición. Para ejecutarlo se presiona el equipo a una profundidad nominal de 5-15 mm en el elemento estudiado y provee lecturas relativas de humedad contenida dentro del material.

Se detectaron valores superiores al 18% en zonas específicas que confirman la presencia de humedad por filtraciones en la cubierta que es una de las causas fundamentales de las lesiones observadas. Estas humedades en el rango del 18 al 20% y superiores crean un ambiente favorable para la proliferación de hongos de la pudrición y otros organismos xilófagos que pueden afectar las propiedades mecánicas de la madera.

En el caso de los elementos donde se han encontrado lesiones y no superan este rango, puede inferirse que han existido etapas donde el aumento de humedad ha sido considerable, permitiendo de esta manera la aparición de agentes degradantes de la madera.

Sondeo con el punzón de los elementos de madera.

El objetivo de este ensayo es determinar el estado de conservación de los pares en la zona cercana a los apoyos, según la medida obtenida por la penetración de un punzón graduado, ver “Figura 24”. Este valor depende de las características y la dureza específica del elemento de madera que se esté analizando. Cuando el punzón no penetra o lo hace superficialmente, significa que el elemento estudiado se encuentra en buen estado. Sin embargo, se obtienen valores de penetración superiores (entre 2-5cm) si los elementos están podridos o desfibrados. El resultado de este ensayo revela que las lesiones identificadas más comunes son: desfibramiento en la zona del cabezal de los pares y cuadrales, en la parte inferior y laterales del 70% de los pares que conforman los faldones del techo, además de otras lesiones como grietas, pudrición, astillamiento y manchas de humedad.



Figura 24. Sondeo de elementos de madera con punzón graduado.

La “Figura 25” resume las lesiones detectadas en el Coro alto, ubicándolas en una planta arquitectónica.

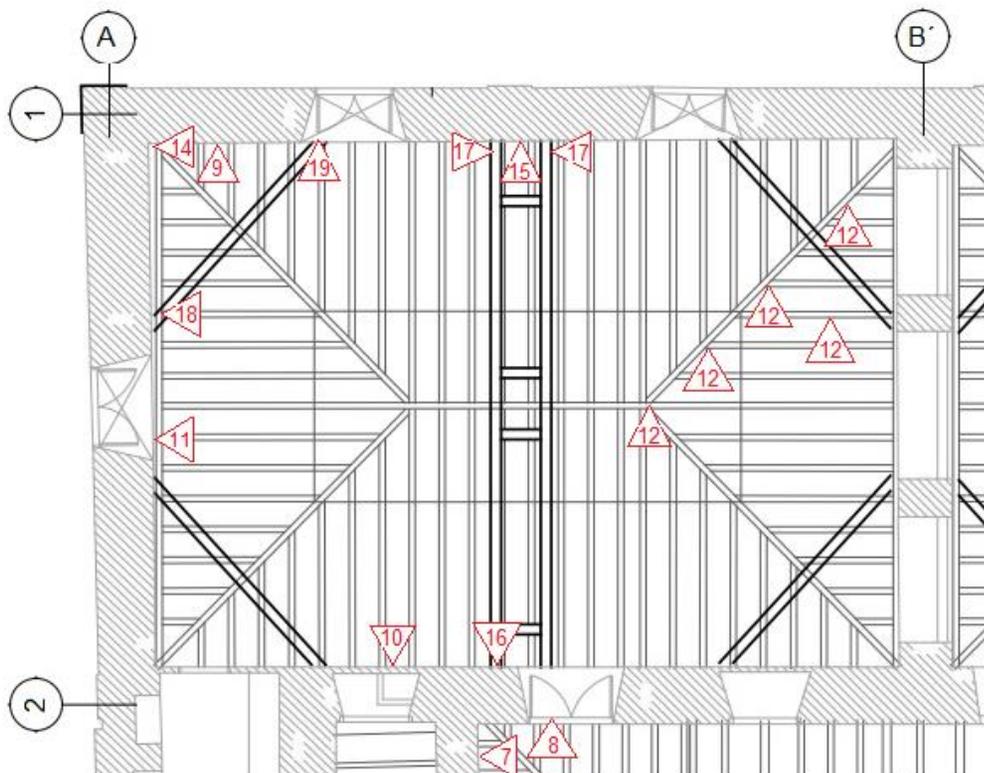


Figura 25. Planta arquitectónica del Coro alto dónde se ubican las lesiones asociadas a las Figuras 7-12 y 14-19.

Identificación de plantas superiores.

Se tomaron fotografías de las plantas hospederas que se encuentran creciendo en la cubierta, ver “Figuras 26 y 27”. La identificación de las plantas superiores se realizó a través de la comparación con ejemplares presentes en el herbario del laboratorio de Biología del Grupo de Diagnóstico de la Oficina del Historiador de La Habana, fueron obtenidos la familia botánica, el nombre vernáculo y científico (Colectivo de autores, 1999); (Roig, 2014) y el porte biológico (Pérez and Rodríguez, 2007); (Pérez, 2010).



Figura 26 y Figura 27. Plantas invasoras en la cubierta del Coro alto.

Las plantas identificadas son de porte herbáceo y de porte arbóreo, las últimas tienen raíces que pueden penetrar en los muros y producir grietas que siguen desarrollándose, ensanchando y creando nuevas tensiones internas en los muros (Pérez, 2010).

Las plantas de porte herbáceo, si bien su acción mecánica es de menor incidencia que las de porte arbóreo, también juegan un papel en el desarrollo de las lesiones, pues contribuyen al deterioro químico del sustrato en que crecen y a la retención de humedad, por lo que facilitan el crecimiento de otras plantas con mayor potencial. Por tanto, se hace necesario conocer a qué especie o grupo pertenece el agente biológico, a partir de lo cual se trazan las estrategias para la conservación del sustrato deteriorado.

Identificación de especies maderables.

Para la realización de este ensayo se tomaron muestras aleatorias de los elementos de madera para su identificación, de forma que posibilite obtener cortes histológicos en las direcciones transversal, tangencial y radial. La observación de los caracteres anatómicos se realizó con el empleo del microscopio óptico de luz.

Las muestras se identificaron por el método de la anatomía comparada, que se basa en la comparación de los caracteres macroscópicos de las muestras con maderas patrones, previamente identificadas y clasificadas en la xiloteca del laboratorio de Biología de la Oficina del Historiador. Los caracteres evaluados son: color, textura, grano, lustre y olor (en las que lo posean) y presencia de anillos de crecimiento (Carreras and Dechamps, 1995). Las muestras se tomaron del cuadrado 4, del arrocabe, del can en esviaje 4 y del friso del faldón D; obteniendo que, el cuadrado en esviaje 4, el arrocabe y el friso del faldón D pertenecen a la especie *Cedrela odorata*, ver “Figura 28” y el cuadrado 4 pertenece a la especie *Tectona grandis*, ver “Figura 29”.

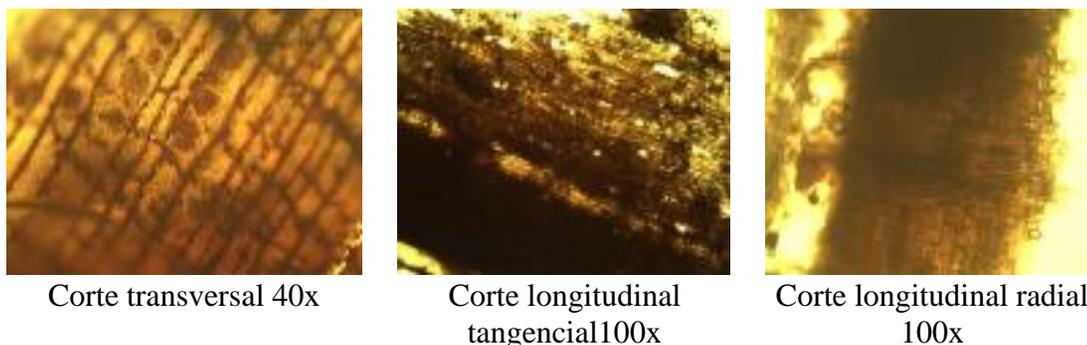
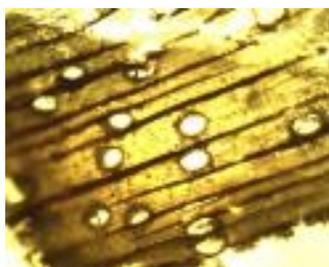


Figura 28. Cortes anatómicos del Cedro.



Corte transversal 40x

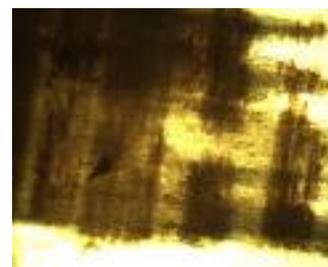
Corte longitudinal
tangencial 40xCorte longitudinal radial
40x

Figura 29. Cortes anatómicos de la Teca.

Los cortes histológicos de las muestras tomadas, en el sentido transversal, longitudinal-tangencial y longitudinal-radial, que se observan en las Figuras 28 y 29, permiten corroborar a partir de la microscopía, según el patrón de parénquima del corte transversal, el cual se aprecia mejor que el de parénquima radial, que las especies maderables son cedro y teca, respectivamente.

Una vez identificadas las especies, en la Tabla 3 se muestran sus propiedades físico-mecánicas, a partir de la información brindada por el Instituto de Investigaciones Agroforestales de Cuba, las que serán empleadas en la modelación estructural de la armadura en el programa SAP 2000 y en el cálculo de los reforzamientos.

Tabla 3. Principales características mecánicas y físicas de las maderas identificadas.

Nombre científico	Nombre vulgar	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (kg/cm ² x1000)	Tracción (kg/cm ²)	Flexión (kg/cm ²)	Compresión (kg/cm ²)		Cortante (kg/cm ²)
						Normal a las fibras	Paralela a las fibras	
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	0,37- 0,75	78.10	690	667	-	302	40
<i>Tectona grandis</i>	Teca	0,61- 0,74	110	850	1160- 1450	-	513- 685	63.2

4. VERIFICACIÓN DE LAS CARGAS ACTUANTES EN LOS TIRANTES

Se modeló la estructura en el programa SAP 2000, ver “Figura 30”, teniendo en cuenta para el análisis de las cargas el peso propio de los materiales (NC 283: 2003), la carga de uso de cubierta (NC 284: 2003) y la carga de viento (NC 285: 2006) según las combinaciones de carga de la NC 450: 2006.

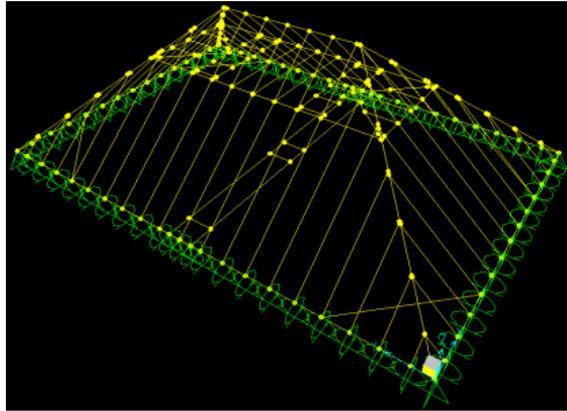


Figura 30. Modelación de la estructura en el programa SAP 2000.

Resultados de la modelación para los esfuerzos axiales en el tirante 1: $NT1=60,15$ kN y en el tirante 2: $NT2=52,49$ kN, obtenidos de la combinación más desfavorable.

5. PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN

5.1 Solución para tirantes con prótesis

Consiste en sustituir la parte retirada por madera, introduciendo barras (de acero o PRF, por sus siglas en inglés: Polymers Reinforced Fiber) en taladros realizados en la madera y realizar el encolado de las barras para que se adhieran bien. Para el diseño se consideró la máxima solicitación axial, para ambos tirantes, de la combinación más desfavorable obtenida de la modelación realizada en el programa SAP 2000. Los diámetros de los taladros deben ser lo suficientemente amplios para dejar una holgura de 3 a 6 mm alrededor de la barra, que se rellenará con epoxi.

Proceso de ejecución: corte con sierra de cadena o serrucho de la parte degradada de la cabeza. Taladrado de agujeros en el tirante original e instalación de las barras. Selección y conformación de la nueva madera a insertar, cajeado para realizar la unión con la solera. Se taladran los agujeros en la nueva inserción y se aplica la resina epoxi en las barras. Finalmente se coloca la nueva madera a insertar que debe cumplir con los requisitos de durabilidad para madera de uso estructural como la restricción de nudos, fendas, control de la humedad de equilibrio higroscópico, entre otros.

Esta solución se puede ejecutar con productos de la compañía italiana de "Materiales auxiliares para la construcción y la industria" (Mapei, por sus siglas en italiano). Consiste en aplicar primero a la madera y los orificios para las barras, el producto Mapewood Primer 100, que es un impregnador epoxídico de consistencia fluida, se deja secar para aplicar luego a las barras y la madera el producto Mapewood Paste 140, que es un adhesivo epoxídico de consistencia tixotrópica muy eficaz en la restauración de elementos estructurales de madera.

5.2 Reforzamiento mediante fibras de carbono

Es una técnica actual de reforzamiento de elementos estructurales, que ha sido empleada no sólo para recuperar estructuras de madera, sino también de hormigón y mampostería. Consiste en fijar al elemento a reforzar, mediante resinas epóxicas, platinas de material sintético con fibra de carbono, que tienen un espesor aproximado de 1,2 mm a 1,4 mm y ancho de 60 mm. Su actuación va dirigida generalmente a absorber los esfuerzos de tracción, en este caso de 60,15 kN obtenido como solicitación axial más desfavorable en la modelación realizada, que se generan dado su elevada resistencia ante esta acción. Las fibras poseen alta resistencia estructural comparada con su peso prácticamente despreciable y son resistentes a la corrosión (Morochó, 2014). La desventaja que representa la aplicación de este método es su elevado costo.

5.3 Sustitución de la solera por otra de madera

La solera se sustituirá por un durmiente con las mismas escuadrías de la original retirada (30x35cm), las uniones en las esquinas se realizarán a media madera y en la longitud de la pieza se realizará cada 5 m mediante un empalme de llave o diente de perro. La madera a emplear será la Manilkara valenzuelana (ácana) que es una madera más dura que el cedro.

Diseño de la unión en la longitud.

La unión en la longitud del elemento se basará en un empalme de llave que consiste en transmitir los esfuerzos de tracción (N_d) de una pieza a la otra a través de una compresión paralela a la fibra aplicada sobre el frente con una superficie $b \cdot t$ "Figura 31". Pasando también el esfuerzo a la sección completa a través de un esfuerzo rasante de tensiones tangenciales en el plano de superficie $b \cdot l$ "Figura 31" (Martitegui et al., 2009).

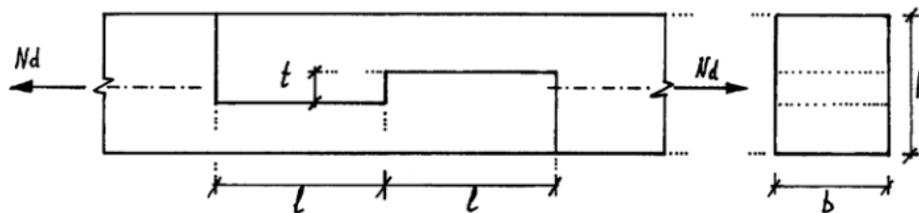


Figura 31. Empalme de llave. Fuente: (Martitegui et al., 2009)

Diseño de la unión en la esquina.

La unión en las esquinas se realizará a media madera "Figura 32", reforzado con tornillos tirafondos como se pueden observar en la "Figura 33", que constan de un fuste conformado por una zona roscada en la punta (cuerda) y un tramo liso (caña).

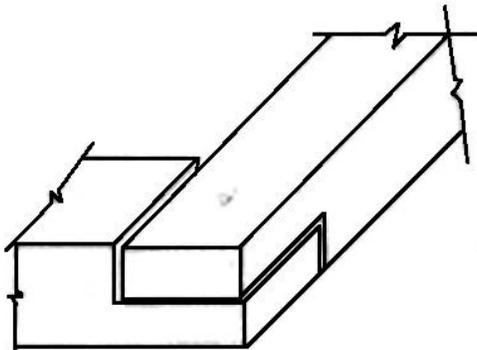


Figura 32. Unión a media madera.
Fuente: (Martitegui et al., 2009).

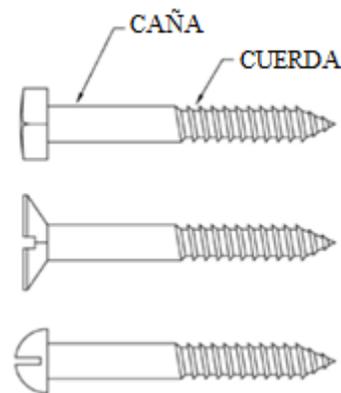


Figura 33. Tirafondos con cabeza hexagonal, avellanada y redonda (de arriba abajo).
Fuente: (Martitegui et al., 2009).

5.4 Sustitución de tirantes por tensores de acero

Consiste en la colocación de tensores de acero que tomarán las tensiones del tirante original, atravesarán la solera fijándose mediante dos tuercas y una placa metálica para evitar aplastamientos en la madera. Empleando los esfuerzos axiales obtenidos a partir de la modelación de los elementos en el programa SAP 2000.

El diseño se realizó considerando que cuando se emplean barras como miembros a tensión pueden mantenerse en posición mediante roscas con tuercas (McCormac, 2002). El esfuerzo nominal a tensión para varillas roscadas cuando la rosca está incluida en el plano de corte, según la tabla J3.2 del Manual de Carga y Factores de Resistencia de Diseño (LRFD por sus siglas en inglés) es igual a $0.75F_u$. La probabilidad de fallo de estos elementos se tiene en cuenta por fractura debido a la reducción de área provocada por las roscas.

Se emplearon en el diseño barras de acero A-36 con tensión de fluencia $F_y=250\text{MPa}$ y tensión última $F_u=400\text{MPa}$. Se analizaron para el tensor más cargado, aunque se colocarán dos tensores en las mismas posiciones de los tirantes.

Es conveniente limitar a $5/8$ plg el diámetro mínimo de los tensores (McCormac, 2002), ya que los de menor diámetro se dañan con frecuencia durante el proceso constructivo. Refiere además que, algunos proyectistas emplean diámetros no menores a $1/500$ de la longitud de los tensores, a fin de lograr cierta rigidez aun cuando los cálculos de esfuerzos permitan diámetros menores.

6. CONCLUSIONES

De las patologías identificadas, las causas más probables están asociadas al exceso de humedad por filtraciones provenientes de la cubierta que han propiciado la proliferación de organismos xilófagos. La lesión que más está afectando el comportamiento del conjunto estructural es la desarticulación o pérdida del vínculo solera tirante, originado por la pudrición de estos elementos en la zona de la fogonadura, provocando el empuje del muro de fachada y su consiguiente desplome evidenciándose en las grietas verticales en la intersección de los ejes y grietas horizontales en el muro del eje 1 del Coro alto. De manera general la estructura se encuentra en un estado regular.

La solución propuesta para resolver la principal lesión fue la sustitución de la solera por otra de madera y los tirantes por tensores de acero, que se revestirán nuevamente en madera para afectar en lo menor posible la estética y la belleza del inmueble que constituye un valor patrimonial.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los especialistas de la Oficina del Historiador de La Habana: de la empresa de proyectos RESTAURA, del Departamento de diagnóstico y de la Dirección de inversiones que confiaron en nuestro servicio para la realización de este trabajo y por toda la colaboración y disponibilidad brindadas. Agradecemos la colaboración de las arquitectas Dayana, Lillian y Linnet.

8. REFERENCIAS

Álvarez, L., Basterra, A., Casado-Sanz, M., y Acuña-Rello, L. (2005), “Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera” en I jornadas de investigación en construcción (2-4 de junio de 2005. Madrid, España). Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC. 165-181.

Arduengo García, D. A., Cruz Pérez, A. (2012), *Una nueva lectura del antiguo convento de Santa Clara de Asís desde la arqueología y la historiografía*. Arquitectura y Urbanismo, 33(1), 77-90. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982012000100006&lng=es&tlng=es.

Basterra, L. A., Casado, M., Acuña, L., Ramón-Cueto, G., López, G., Barranco, I., Relea, E. (2005). *Avance de propuestas metodológicas para el diagnóstico y análisis de estructuras de maderas históricas*. In Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz (pp. 27-29).

- Carreras, R., Dechamps, R. (1995). *Anatomía de la madera de 157 especies forestales que crecen en Cuba y sus usos tecnológicos, históricos y culturales*. v. 1: El texto, v. 2: Las láminas.
- DCTA-UPM (1998), "*Tratado de rehabilitación: Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*". Tomo 3, Ed. Munilla-Leria.
- Espiniella, D. T. (2001). *Del barroco colonial cubano. Su expresión en la arquitectura religiosa de La Habana*. In Actas III Congreso Internacional del barroco americano: Territorio, Arte, Espacio y Sociedad: Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, 8 al 12 de octubre de 2001 (p. 71).
- Instituto de Ecología y Sistemas de Cuba (1999), *Cuba y sus árboles*. Editorial Academia La Habana. ISBN: 959-02-0252-7
- López, P. A. H. (2006). *El Convento de Santa Clara de La Habana Vieja* (R. y. M. C. Centro Nacional de Conservación Ed.). La Habana Vieja. Cuba: Consejo Nacional de Patrimonio Cultural.
- Martitegui, F. A., González, G. Í., Herrero, M. E., Álvarez, R. A., Cabo, J. L. F. (2009). *Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera*. Documento de aplicación del Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Técnico 03: MADERIA. Sociedad Española de la Madera.
- Matauco, E. N. (2000). *La carpintería de armar española*. (Munilla-Lería Ed.). Ministerio de Cultura, Instituto de Conservación y Restauración de bienes culturales. España.
- McCormac, J. C. (2002). *Diseño de estructuras de acero*. Método LRFD (S. A. d. C.V. Alfaomega Grupo Editor Ed. 2ª edición ed.).
- Morocho, D. E. E. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas*. (Bachelor's thesis), Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador.
- Norma Cubana (2003), *NC 283: 2003 Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño*.
- Norma Cubana (2003), *NC 284: 2003 Edificaciones. Cargas de uso*.
- Norma Cubana (2006), *NC 285: 2006 Carga de viento. Método de cálculo*.
- Norma Cubana (2006), *NC 450: 2006 Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones*.
- Otaño, I. M. G. (2002). *Métodos Organolépticos de Evaluación y Dictámen. Paper presented at the Conferencia. II: Evaluación Organoléptica y Diagnóstico en Edificaciones*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Facultad de Arquitectura.
- Pérez, A. C., & Rodríguez, R. (2007). *Plantas epilíticas del Castillo de La Fuerza en el Centro Histórico de La Habana Vieja, mecanismos de dispersión y distribución*. Revista del Jardín Botánico Nacional. Universidad de La Habana, 61-64.
- Pérez, A. C. (2010). *Plantas epilíticas deteriorantes de la Fortaleza San Carlos de la Cabaña*. Revista del Jardín Botánico Nacional. Universidad de La Habana, 219-222.
- Rodríguez, O. A. (2003). *Patología, diagnóstico y rehabilitación de edificaciones*. Monografía. Instituto de Ensayos y Materiales. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. Bolivia.
- Rodríguez, O. Á. (2006). *Metodología para realizar el estudio de diagnóstico para la rehabilitación estructural de forjados planos de madera en edificaciones ubicadas en el Centro Histórico de La Habana*, (Doctorado), CUJAE.
- Roig, J. T. (2014). *Diccionario botánico de nombres vulgares cubanos* (E. Científico Técnica Ed. Cuarta edición ed.). La Habana.
- Santiesteban, F. C. (2007). *Las armaduras de pares en La Habana Vieja. El privilegio de su conservación*. Gabinete de Arqueología, 6, 49-60.
- Tejera Garófalo, P. (2000). *Patología de las Edificaciones en conservación y rehabilitación de edificaciones*. Folleto Maestría.
- Weiss, J. E. (1978). *Techos coloniales cubanos* (E. A. y. Literatura Ed.). La Habana: Editorial Arte y Literatura.

Análisis de manifestaciones patológicas del concreto en viaductos urbanos

H. J. N. Lima¹ * , R. S. Ribeiro² , R. A. Palhares³ , G. S. S. A. Melo¹ 

* Autor de Contacto: hjnerj@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>

Recepción: 14/06/2018 | Aceptación: 14/11/2018 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Paulo Helene

RESUMEN

El trabajo presenta el estudio de casos de manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón, ubicadas en el Eje Rodoviario Norte de Brasilia, por medio de la metodología GDE / UnB, que califica y cuantifica la degradación de daños estructurales. Se realizó la caracterización del estado general de la estructura con la finalidad de servir de subsidio para tomas de decisiones en cuanto a intervenciones rutinarias, para ampliar la vida útil de la estructura. La rutina metodológica consiste en la realización de inspecciones en campo, catálogo de las manifestaciones patológicas estructurales con levantamiento fotográfico, caracterización de las manifestaciones patológicas y clasificación según los factores de ponderación y factores de intensidad de daños de la estructura conforme a la metodología GDE / UnB para obras de arte especiales, calculo y clasificación global de los daños de la estructura.

Palabras clave: manifestaciones patológicas; estructura de hormigón; viaductos.

Citar como: Lima, H. J. N., Ribeiro, R. S., Palhares, R. A., Melo, G. S. S. A. (2019), "Análisis de manifestaciones patológicas del concreto en viaductos urbanos", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 247 – 259, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>

¹ Universidade de Brasília, Brasil.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Analysis of pathological manifestations of concrete in urban overpasses

ABSTRACT

The paper presents the case study of pathological manifestations in concrete structures, located in the Northern Road Hub of Brasília, using the GDE / UnB methodology, which qualifies and quantifies the degradation of structural damages. The general state of the structure was characterized in order to serve as a subsidy for decision making regarding routine interventions, in order to extend the useful life of the structure. The methodological routine consists of conducting field inspections, catalog of structural pathologies with photographic survey, characterization of pathologies and classification according to the weighting factors and damage intensity factors of the structure according to the GDE / UnB methodology for special works of art, calculation and overall classification of the structure damage.

Keywords: pathologies; concrete structure; viaducts.

Análise de manifestações patológicas do concreto em viadutos urbanos

RESUMEN

O trabalho apresenta o estudo de caso de manifestações patológicas em estruturas de concreto, localizadas no Eixo Rodoviário Norte de Brasília, por meio da metodologia GDE/UnB, que qualifica e quantifica a degradação de danos estruturais. Foi realizada a caracterização do estado geral da estrutura com a finalidade de servir de subsidio para tomadas de decisões quanto a intervenções rotineiras, de forma a ampliar a vida útil da estrutura. A rotina metodológica consiste na realização de inspeções em campo, catálogo das manifestações patológicas estruturais com levantamento fotográfico, caracterização dos fenômenos patológicos e classificação segundo os fatores de ponderação e fatores de intensidade de danos da estrutura conforme a metodologia GDE/UnB para obras de arte especiais, cálculo e classificação global dos danos da estrutura.

Palabras clave: manifestações patológicas; estrutura de concreto; viadutos.

1. INTRODUCCIÓN

La correcta identificación del origen de los problemas patológicos permite al investigador establecer en qué momento del gerenciamiento de la obra ellos ocurrirán, se tuvieron origen en la fase de proyectos; en la especificación del material; en la etapa de ejecución de la construcción por el uso de una mano de obra no especializada; por falta de fiscalización; o si las fallas fueron debidas al uso inadecuado o mantenimiento deficiente.

Ese análisis de identificación y propuesta de ataque a las manifestaciones patológicas es adecuado si se compara al costo de cambios tardíos cuando ya las manifestaciones ocurren, definido en el gerenciamiento de obras por Mattos (2010) y por el PMBOK (2014). En este enfoque al evaluarse el costo de evitar un problema patológico en diferentes fases de una obra, se observa que cuanto más tardío identificamos la posibilidad de un problema o manifestaciones patológicas por falta de planificación, mayor será el costo de su reparación y la posibilidad de colapso estructural.

Según Helene (1997), los costos de intervención crecen exponencialmente cuanto más tarde es dicha intervención y en resumen pueden ser evitados en las siguientes fases:

- a. Fase de proyecto - representa el costo de referencia, entre las medidas que pueden ser verificadas para evitar problemas futuros. Se puede destacar como medidas mitigadoras:
 - Aditivos y adiciones para mejorar la durabilidad del concreto y disminuir la permeabilidad;

- Aumentar el espesor de recubrimiento de la armadura como medida de protección contra la corrosión;
 - Reducir la relación a/c del concreto de forma de disminuir la porosidad de la matriz pasta de concreto y consecuentemente disminuir la permeabilidad;
 - Aumento de la resistencia característica del concreto.
- b. Fase de ejecución – su intervención tardía implica en un costo 5 (cinco) veces superior al costo de una intervención tomada como referencia en la fase de proyecto.
- c. Fase de mantenimiento preventivo - pueden costar hasta 25 veces más que medidas correctas tomadas durante la fase de proyecto estructural. Medidas usuales que podrían evitar el aumento de los costos:
- Pinturas periódicas
 - Impermeabilizaciones
- d. Fase de mantenimiento correctivo - corresponde a la reparación de las estructuras que ya presentan manifestaciones patológicas visibles. A estas actividades se les puede asociar en un costo 125 veces superior al costo de las medidas que podrían y deberían haber sido tomadas en la fase de proyecto. Cabe resaltar que el alto costo no sólo apenas está asociado a los costos de mano de obra y de los materiales del mantenimiento propiamente dicho, también a los costos indirectos relacionados a su intervención, como el tiempo y trastornos de la intervención de la estructura en el período de reparación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Incidencias patológicas en el concreto

Según Metha (2008) y Ribeiro (2014), las causas patológicas del concreto pueden ser divididas en tres grupos: físicos, químicos y biológicos.

Las causas físicas del deterioro del concreto pueden ser subdivididas en dos categorías: desgaste superficial (o pérdida de peso) por causa de la abrasión, la erosión y de cavitación; fisuración a razón de gradientes normales de temperatura y humedad, presiones de cristalización de sales en los poros, carga estructural y exposición a temperaturas extremas, tales como congelamiento ó fuego. Las causas químicas del deterioro del concreto generalmente son debido a la presencia de sustancias químicas, pudiendo ocurrir por: hidrólisis y lixiviación de los componentes de la pasta de cemento por agua pura; cambios iónicos entre fluidos agresivos y la pasta de cemento; reacciones causantes de productos expandibles, tales como expansión por sulfatos, reacción álcali-agregado y corrosión de la armadura del concreto.

Las causas biológicas están relacionadas principalmente con la presencia de microorganismos, que propician ambientes corrosivos agresivos a la pasta de concreto y al acero, por medio de bacterias oxidantes de azufre o de sulfuros, los cuales aceleran el deterioro de estas estructuras.

2.2 Ensayos no destructivos

Muchas veces, además del análisis visual, se hace necesaria la realización de ensayos destinados a ofrecer informaciones relacionadas las condiciones de resistencia y ruptura de componentes de la estructura inspeccionada, además de mayor conocimiento sobre el suelo de fundación.

La decisión de la realización o no de ensayos complementarios a la inspección visual queda a cargo del ingeniero responsable por la elaboración del informe técnico. Los ensayos más conocidos en las estructuras de concreto y albañilería son clasificados como no destructivos y ensayos destructivos según la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos destructivos y no destructivos

No destructivos	Destructivos
Esclerometría; Carbonatación; Control de fisuras con sellos de yeso o vidrios; Ultrasonografía; Ganmagráfia; Prueba de carga; Mediciones de deformaciones y asentamientos.	Resistencia a compresión axial en testigos retirados de la estructura; Resistencia a la tracción en testigos retirados de la estructura; Módulo de deformación del concreto y de morteros; Reconstitución de mezcla de concreto y de mortero; Peso específico, permeabilidad y absorción de agua; Contenido de cloruros; Determinación de la tracción en muestras de armadura retiradas de la estructura; Determinación del potencial de corrosión de muestras de armadura retiradas de la estructura; Resistencia a compresión de ladrillos y bloques individuales; Resistencia a compresión de prismas de ladrillos y bloques.

3. ESTADO DEL ARTE DE LA METODOLOGÍA GDE/UNB

El uso de la metodología GDE/UnB es pertinente para el análisis de manifestaciones patológicas una vez que hace posible la comparación, de forma rápida y objetiva, del grado de deterioro de diferentes estructuras de concreto, por medio de datos recolectados en inspecciones visuales en campo.

Diversos autores desarrollaron la metodología y la adaptaron en el transcurso del tiempo para diferentes aplicaciones.

Klein et.al. (1991) fue el precursor de la metodología perfeccionada en la Universidad de Brasilia. El estudio tuvo como objetivo crear e implementar un proceso de inspecciones sistematizadas en estructuras de concreto con la intención de priorizar acciones de reparos de estructuras en la ciudad de Porto Alegre. La metodología clasifica las estructuras en función de la variedad y gravedad de los problemas presentados, a través de la definición de un grado de riesgo. El estudio resultó del convenio firmado entre la Universidad Federal de Rio Grande del Sur y la Prefectura Municipal de Porto Alegre donde fueron clasificadas once obras en función del grado de deterioro por daños impuestos por las manifestaciones patológicas.

Castro et al. (1995) desarrolló una metodología sistémica, adoptando por base de las observaciones realizadas por Klein et.al. (1991). La metodología de Castro, también llamada metodología GDE/UnB, tiene como objetivo adaptar las evaluaciones específicas de puentes y viaductos para cualquier estructura de concreto convencional. En el modelo fueron implementadas formulaciones, perfeccionadas del modelo de Tuutti (1982) de la evolución de la corrosión de armaduras de concreto. Por analogía, el autor logró cuantificar el grado de deterioro en que se encontraban las estructuras para otros procesos de degradación. Posteriormente implementó la metodología de Cuaderno de Inspección, que se trataba de un documento esencial de toma de datos, que contiene la conceptualización de los daños de mayor incidencia y referencias para los valores de Factores de intensidad del daño.

Lopes (1998), utilizó la metodología para desarrollar el estudio de perfeccionamiento del sistema de mantenimiento predial de un edificio comercial. Por medio de la cuantificación de la degradación física fue posible prever de manera confiable el mejor instante para intervenciones de mantenimiento predictivo en las edificaciones. En este estudio fue analizado el grado de deterioro de la estructura individual, asociándolos a los demás componentes, que permiten como resultado un índice de degradación único para la edificación. Entre tanto se verificó la necesidad de realizar

algunas alteraciones en la metodología propuesta por Castro et al. (1995), visando mejorar su aplicabilidad. En este estudio fueron hechas las alteraciones: en las familias de elementos, en la relación de daños, la definición de nuevos factores de ponderación de daños y en la formulación de cálculo del grado de deterioro de un elemento (G_{de}). La investigación fue realizada en seis edificios del Banco de Brasil y de forma general mostró ser eficiente para su uso en aplicaciones de edificaciones.

Boldo (2002) relata los resultados de evaluaciones efectuadas en cuarenta edificaciones de estructuras de concreto del Ejército Brasileño, referente a la aplicación de la metodología, que permitió cuantificar el grado de deterioro de estructuras de concreto, mediante parámetros que evalúan las manifestaciones de daños y su evolución. Con la eficiencia de la metodología GDE/UnB para el uso en edificaciones demostrada, este permitió establecer programas de mantenimiento sistemáticos y más eficaces en instalaciones del Ejército.

Fonseca (2007) aplicó la metodología GDE/UnB en estructuras de edificaciones del Instituto Central de Ciencias de la UnB – ICC y propuso alteraciones de la formulación para el cálculo del Grado de deterioro de una familia (G_{df}) y del grado del daño (D).

Euqueres (2011) realizó un estudio con 11 inspecciones en estructuras de puentes a fin de validar propuestas de reformulación de cálculo de deterioro de la estructura según la metodología GDE/UnB como forma de basarse en las decisiones referentes a la rehabilitación de la obra inspeccionada y se realizaron inspecciones visuales en todas las estructuras. El autor enfatizó la muestra de las incidencias de las manifestaciones patológicas pertinentes en las estructuras, entre las cuales se puede relatar la corrosión de las armaduras, fisuras por aplastamiento de la pieza, aplastamiento de los aparatos de apoyo, eflorescencia con formación de estalactitas, fallas de vaciado y manchas de humedad.

Medeiros (2015) evaluó las condiciones de durabilidad del Puente sobre el Rio do Carmo en una región de elevada clase de agresividad ambiental. En el estudio fueron realizados ensayos no destructivos de esclerometría, ultrasonido, ensayo de profundidad de carbonatación y ensayo de presencia de cloruros. Las manifestaciones patológicas fueron evaluadas utilizando las metodologías de inspecciones: norma DNIT 010/2004 y la GDE/UnB. Según Medeiros por el análisis de los resultados, comparativamente la metodología GDE/UnB resultó en mayor precisión, debido a la riqueza de detalles en su análisis.

Verly (2015) así como Medeiros (2015) evaluó dos metodologías de inspección de estructuras en cuanto a la evaluación de obras de arte especiales: Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT) y la metodología GDE/UnB. Verly realizó inspecciones visuales en 22 viaductos localizadas en Brasilia/DF. Inicialmente fueron propuestas alteraciones en la formulación de la metodología GDE/UnB para una mejor aplicación a obras de arte especiales. Por la incidencia de los diferentes daños en las estructuras inspeccionadas, nuevamente se concluyó que la metodología GDE/UnB presentó resultados con una mejor escala de valores que facilitan la priorización de las estructuras en cuanto a la toma de decisión para intervenciones.

3.1 Metodología GDE/Unb

Se realiza una serie de inspecciones al elemento a ser analizado y luego es realizado un informe fotográfico de las manifestaciones patológicas presentadas que son comparadas con el cuadro de referencia para la atribución de valores de daños. Con estos datos es posible desarrollar las rutinas de la metodología GDE/UNB.

La Figura 2 presenta el diagrama de bloque con la secuencia de análisis del modelo de identificación de grado de deterioro de los elementos y los demás parámetros utilizados en la metodología.

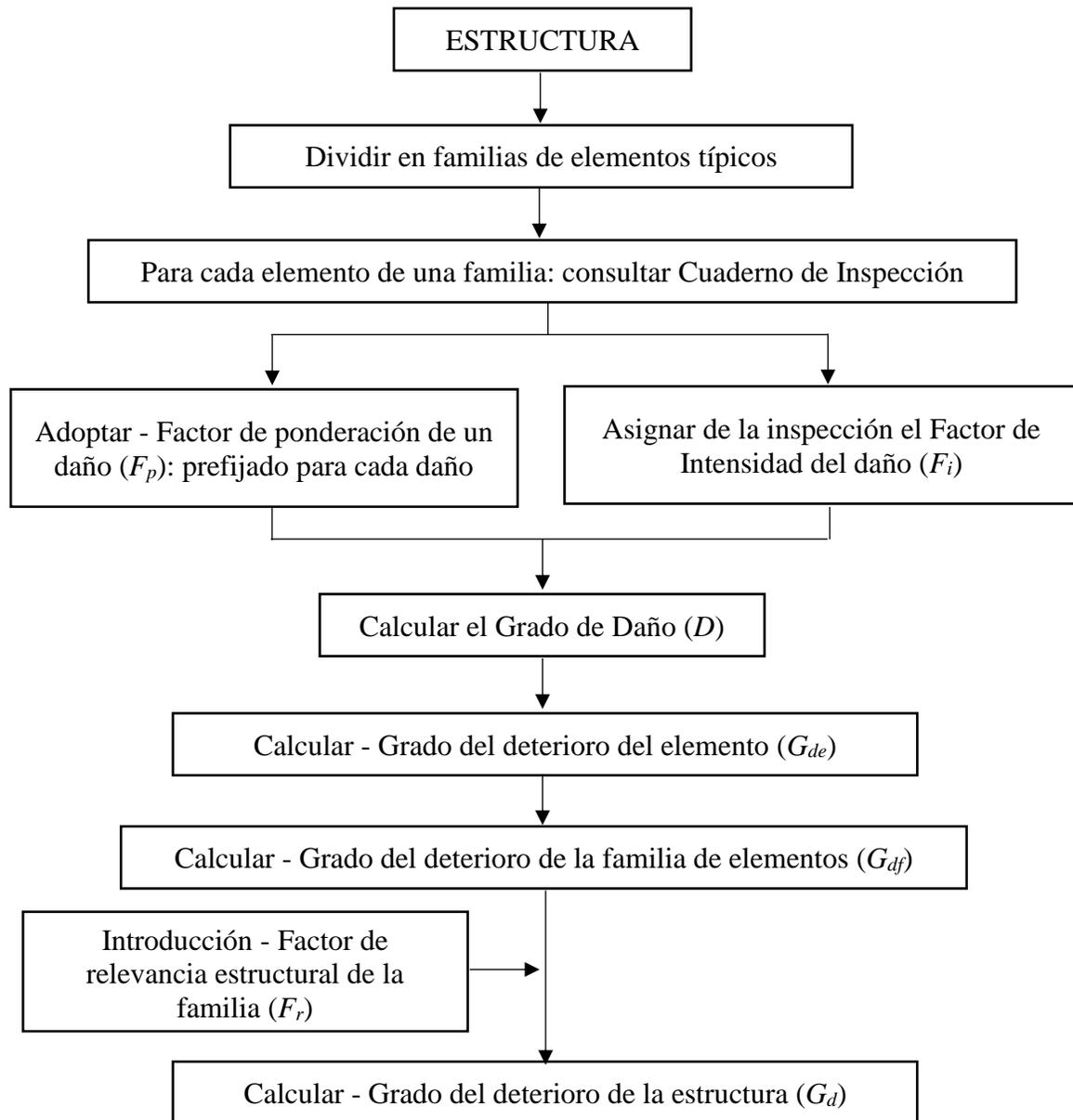


Figura 2. Estructura de la Metodología GDE/UNB

Inicialmente es realizada la conceptualización de los daños y degradaciones típicas. Con ayuda de las Tablas de referencia son atribuidos los valores de los factores de ponderación de los daños (F_p) según la familia de elementos y los factores de intensidad de los daños (F_i) de los elementos. Después con uso de las formulaciones es realizado el cálculo para la determinación de los grados de daños existentes en cada elemento, de las familias de elementos y del grado de deterioro global de la estructura.

Vale resaltar que la Norma Brasileña que versa sobre la inspección de las obras de arte es la ABNT NBT 9452 (2016) – Inspección de puentes, viaducto y pasarelas de concreto – Procedimiento.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el análisis de la metodología y de los resultados fueron realizadas inspecciones en 03 viaductos, todos localizados en la Avenida Eje L, Eje W y Eje Norte. Os 03 están localizados en el sentido perpendicular a las avenidas, entre las super cuadras 103/104 y 203/204 Norte, conforme la Figura 3.



Figura 3. Localización de los 03 viaductos de las supercuadras 103/104 y 203/204 Norte.

Fueron analizados apenas los elementos estructurales del viaducto que estaban visibles. Los elementos analizados son compuestos por estaca, losa, barandas y tablero. Como la longitud entre los apoyos del viaducto es relativamente corta, ninguna estructura presentó pilares intermedios. La metodología fue aplicada y utilizada para cuantificar los daños estructurales, sirviendo así de apoyo para la toma de decisión de las intervenciones.

Como ya hubo muchos mantenimientos de repavimentación de la estructura a lo largo de los años, no fue posible verificar el estado de las juntas de dilatación.

A continuación, son presentados los datos tomados de cada estructura analizada.

4.1 Viaducto 01

El Viaducto 01 queda localizado en el Eixo (eje) L próximo a las supercuadras 103/104 Norte.

Fueron identificadas manchas en los elementos estructurales de concreto armado en contacto con el suelo y a la intemperie, presentadas en la Figura 4. Estas pueden ser causadas principalmente por la infiltración de agua por lluvia del suelo adyacente a la estructura y por la infiltración de agua del pavimento flexible de la pista de rodamiento para la losa. Esta situación puede ser atenuada si tuviera un gotero lateral del piso de apoyo de la baranda que está sobre la losa y la impermeabilización de la capa de concreto sobre la losa antes de la capa de CBUQ del pavimento. Estos fenómenos de impermeabilización deficiente también fueron vistos en las estacas.

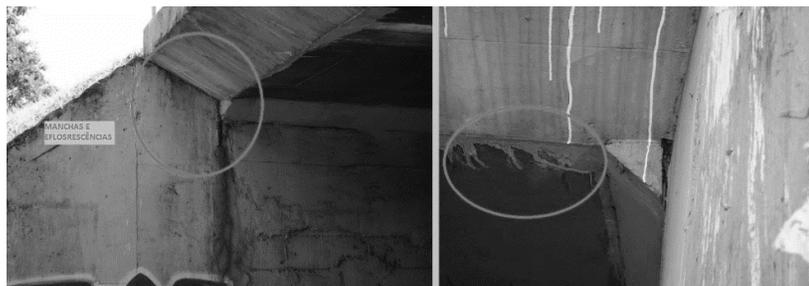


Figura 0. Manchas en la estructura de la Losa

Por el análisis de la Figura 5 fue constatada, en la región de la Losa, muchos lugares con recubrimiento insuficiente de concreto para la protección de la armadura de acero. Como resultado de ese recubrimiento insuficiente se puede percibir que la durabilidad de la armadura fue afectada de forma significativa, por el nivel de deterioro que el acero presentó por estar expuesto a humedad, se observó una reducción de sección del acero.



Figura 5. Recubrimiento insuficiente y deterioro de la Armadura

Fueron verificadas fallas en el vaciado de la superficie de la losa, así como segregación del agregado, por mala colocación del concreto y vibración. Se pudo observar también el fenómeno de deterioro del acero principalmente sobre algunas armaduras longitudinales.

Se verificó otro factor de daño, que, a pesar de interferir en la integridad de la durabilidad en la estructura, no está incluido en la Metodología GDE/UnB que es el impacto de vehículos en la estructura. En este caso específico se observa en la Losa la gran cantidad de marcas de recorrido de la parte superior de camiones de carga.

La pista de rodamiento, en cuanto a la metodología, presentó resultados de mantenimiento y conservación buenos, aparentemente, no presentando desgaste superficial excesivo y ni la presencia de grietas ni huecos.

4.1.1 Análisis del Grado de Deterioro de la Estructura (GD)

A partir de la inspección, fué calculado el Grado de Deterioro de la Estructura. El resultado final del deterioro global de la estructura es definido como el promedio ponderado de los grados de deterioro de las familias de elementos (G_{df}), teniendo como pesos los respectivos factores de relevancia (F_r) de la Tabla 2. Siendo considerado el grado de deterioro para la estaca de contención 7,8, para la baranda 6,0, para la losa del tablero 34,67.

$$G_d = \left(\frac{\sum_{i=1}^n F_{ri} \cdot G_{df}}{\sum_{i=1}^n F_{ri}} \right) \quad (01)$$

$$G_d = \left[\frac{(7,8 \cdot 3) + (6,0 \cdot 1) + (34,67 \cdot 4)}{3 + 1 + 4} \right] = \frac{168,08}{8} = 21,01 \quad (02)$$

Grado de deterioro de la estructura (G_d) del Viaducto 01 = 21,01

Tabla 2. Factor de Relevancia Estructural de las familias de elementos (F_r)

Familia	Fr
Barreras, barandas, separadores, pista de rodamiento	1
Juntas de dilatación	2
Travesaños, estacas, alas	3
Losas, fundaciones, vigas secundarias, aparatos de apoyo	4
Vigas y pilares principales	5

La estructura tuvo un G_d final de 21,01 que según el nivel de deterioro es considerado promedio para valores en el rango 15-50, por lo tanto, para el Viaducto 01 se recomienda definir plazo y la

naturaleza de una nueva inspección y planificar una intervención a largo plazo de no más de 2 años. Vale resaltar que ese plazo para la inspección/intervención es de acuerdo con el método de análisis adoptado, los autores consideran que las intervenciones deben ser inmediatas y las inspecciones periódicas.

4.2 Viaducto 02

El viaducto 02 queda localizado sobre el Eje entre las supercuadras 103/104 y 203/204 Norte.

El viaducto presentó una gran cantidad de manchas en diversas partes de la estructura, la mayoría en la parte que queda expuesta a lluvia sin protección. Figura 6.



Figura 6. Manchas esparcidas por la estructura

En la Figura 7 puede ser observado, diferentes tipos de daños en las barandas entre éstos, falla de vaciado, pérdida del recubrimiento de concreto en los pilares que resultan en la exposición del acero a lluvias y a los agentes corrosivos en la armadura.

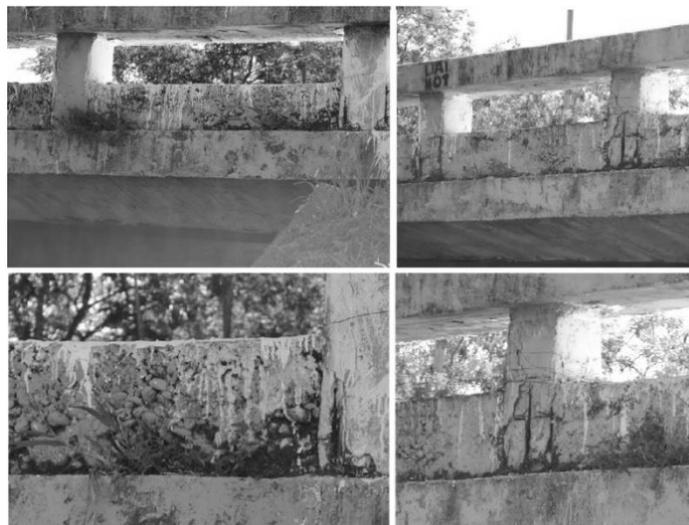


Figura 7. Falla en el vaciado, pérdida de concreto y manifestaciones patológicas en la armadura (Barandas)

En las losas del tablero, también fueron observados varios daños como: falla del vaciado por falta de vibración en el concreto posterior a su colocación; manifestaciones patológicas de la armadura y en algunos lugares, es posible notar un recubrimiento deficiente por la visualización de trechos expuestos de la armadura en pequeñas extensiones. En el área de los bordes de la losa, donde queda la parte más susceptible la acción de la lluvia, se puede percibir manchas acentuadas de gran extensión. También se puede verificar que este fenómeno tiene comprometida la armadura por el deterioro del acero y en algunas partes es posible, visualmente notar, la pérdida de sección.

Fueron observados daños como recubrimiento insuficiente, falla en el vaciado, manchas y ataque a la armadura. En la parte inferior de la viga de la protección, fueron vistos señales de fallas de vaciado, grietas, pérdida del concreto y manifestaciones patológicas de las armaduras en las regiones del acero expuesto.

En la Figura 8 es posible visualizar una grieta vertical y restos de trozos de madera en la región de la estaca, se verifica también la condición del pavimento flexible sobre la losa del viaducto, por la figura, se nota un pequeño hueco y una grieta perpendicular al flujo de la pista, donde hay indicios que haya sido causada por el desgaste del material de la junta de dilatación del tablero.

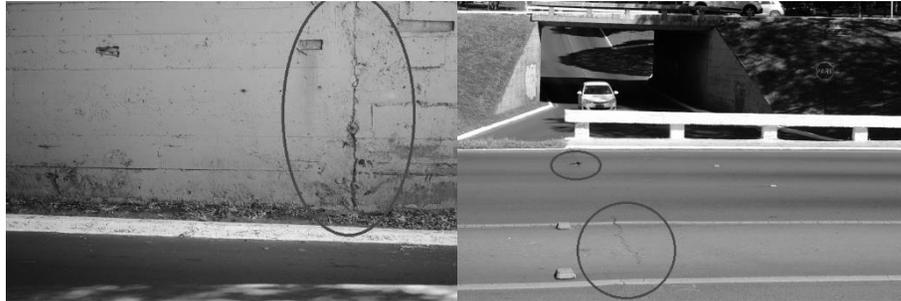


Figura 8. Grieta en la Cortina e incidencias patológicas en la pista de Rodamiento

4.2.1 Análisis del Grado de Deterioro de la Estructura (GD)

El resultado final del deterioro global de la estructura (Gdf), teniendo como pesos los respectivos factores de relevancia (Fr), fué de 37,25, que según el nivel de deterioro es considerado mediano para valores en el rango de 15-50, por lo tanto, para el Viaducto 01 se recomienda definir plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar la intervención a largo plazo, en no más de 2 años. Cabe resaltar que ese plazo para la inspección/intervención es de acuerdo con el método de análisis adoptado, los autores consideran que las intervenciones deben ser inmediatas y las inspecciones deben ser periódicas.

4.3 Viaducto 03

El viaducto 03 queda localizado en el Eje W próximo a las supercuadras 203/204 Norte.

En la Figura 9 se observa dos tipos de daños frecuentes causados por el impacto de vehículos en este tipo de viaducto, tanto relacionado al impacto de un vehículo sobre la baranda de protección cuanto al recorrido de la carrocería de camiones de carga que trafican en la vía con altura superior al lado derecho del viaducto, causando daños en el recubrimiento de la losa y en algunas ocasiones la propia armadura de la estructura.



Figura 9. Daño en la estructura de la baranda de protección y vista general - daño en la losa por recorrido de vehículos debido la altura.

4.3.1 Análisis del Grado de Deterioro de la Estructura (GD)

Aplicando la metodología se encontró un G_d final de 19,48 que según el nivel de deterioro es considerado mediano para valores en el rango de 15-50, por lo tanto, para el Viaducto 03 se recomienda definir plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar una intervención a largo plazo de no más de 2 años. Vale resaltar que ese plazo para inspección/intervención y de acuerdo con el método de análisis adoptado, los autores consideran que las intervenciones deben ser inmediatas y las inspecciones deben ser periódicas.

5. CONCLUSIONES

A partir de las informaciones obtenidas en la literatura técnica, inspecciones de campo y el uso de la metodología GDE/UNB se presentan las conclusiones a continuación, con la finalidad de servir de ayuda para tomar de decisiones en cuanto la priorización de intervenciones de rutina, para que se amplíe la vida útil de sus elementos y de la estructura de forma global.

- En el viaducto 01 el elemento que presentó mayor grado de deterioro fue la Losa con un valor de 34,67, siendo recomendado para la misma definir un plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar la intervención a largo plazo, en menos de 2 años debido a su grado de daño Mediano.
- En el viaducto 01, el G_d presentó un valor final de 21,01 que según el nivel de deterioro es considerado mediano, por lo tanto, se recomienda definir el plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar una intervención a largo plazo en menos de 2 años.
- En el viaducto 02, el elemento que presentó mayor grado de deterioro fue la Losa con un valor de 62.46 considerado alto, siendo recomendado definir plazo para inspección especializada y planificar la intervención a mediano plazo en un período menor a un año.
- En el viaducto 02, el G_d presentó valor final de 37,25 que según el nivel de deterioro es considerado mediano, por lo tanto, se recomienda definir plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar una intervención a largo plazo de menores de dos años.
- En el viaducto 03 el elemento que presentó el mayor grado de deterioro fue la baranda, con el valor de 84,53 considerado un nivel alto, recomendando definir plazo para inspección especializada rigurosa y planificar la intervención a corto plazo, en menos de 6 meses.
- En el viaducto 03, el G_d presentó valor final de 19.48 que según el nivel de deterioro es considerado mediano, por lo tanto, se recomienda definir plazo y naturaleza de una nueva inspección y planificar la intervención a largo plazo en menos de dos años.
- Siendo así el Viaducto 02 fue el que presentó el mayor valor de deterioro de 37.25, toda vez que los viaductos son muy próximos, una justificación plausible para esta diferencia de valores sería el flujo de vehículos que, en este viaducto, es más intenso que los otros dos, causando la disminución de su durabilidad y vida útil de la estructura.
- Los elementos que también sufrieron la mayor incidencia de daños fueron las losas que pueden ser comprobados tanto visualmente por los registros fotográficos de campo como por los resultados de la metodología.

Ante esto, se considera que la metodología atiende a la premisa de colaborar con el ingeniero responsable en la toma de decisión de forma rápida sobre inspecciones de viaductos y otras obras de arte especiales. Sugiere que las inspecciones sean hechas periódicamente y que el mantenimiento también sea periódico a fin de garantizar la seguridad y durabilidad estructural de los elementos analizados.

La reparación y refuerzo de los elementos que necesiten de intervención, deben ser provenientes de proyectos elaborados por profesionales especializados y ejecutados por empresas con capacidad técnica para la actuación en recuperación y refuerzo de estructuras de puentes. Un

punto que debe ser tomado en consideración es que debe ser implementado un sistema de gestión para que sean gerenciadas las obras, inspecciones, monitoreo e intervenciones. El tráfico aumenta constantemente, lo que evidencia la necesidad de control del sistema vial.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CNPq, a CAPES y a FAP-DF por el apoyo financiero en todas las etapas de esta investigación. Agradecen también al Centro Universitario del Distrito Federal – UDF por el apoyo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016), *ABNT NBR 9452:2016 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Boldo, P. (2002), *Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 295p.
- Castro, E. K. (1994), *Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 185 p.
- Castro, E. K., Clímaco, J. C. T. S., Nepomuceno, A. A. (1995), “*Desenvolvimento de uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto armado*”, 37º. Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto - Ibracon, Anais, v.1, pp. 293-307, Goiânia.
- Euqueres, P. (2011), *Metodologia de inspeção em estruturas de pontes de concreto armado*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 168 p.
- Fonseca, R. P. (2007), *A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 213 p.
- Helene, P. R. L. (1997), *Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São Leopoldo. Anais, São Leopoldo: ANTAC, 1997. p. 31-42.
- Klein, D. L., Gastal, F. P. S. L., Campagnolo, J. L. (1998), *Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte*. In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 1991, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 1991, p. 185-197
- Lopes, B. A. R. (1998), “*Sistema de manutenção predial para grades estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 308 p.
- Mattos, Aldo Dórea (2010), *Planejamento e controle de obras*. Pini.
- Medeiros, A. G. (2015), *Análise de durabilidade da ponte do Rio do Carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UNB*. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. URI: <http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20496>
- Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. (2008), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3º ed., IBRACON, São Paulo, p. 674.
- Ribeiro, D. V. et al. (2014), *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise*. 1º ed., Campus / Elsevier, Rio de Janeiro, 2014. p. 272. ISBN:978-85-352-

7547-6

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm - Swedish Cement and Concrete Research Institute.

Verly, R. C. (2015), *Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)—Universidade de Brasília, Brasília.