

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 Perdriz, **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:

Dr. Francisco Alberto Alonso Farrera
Universidad Autónoma de Chiapas
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, **México**

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

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

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

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 Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –

INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

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

<http://www.revistaalconpat.org>

Con gran satisfacción, presentamos el tercer número del décimo año de la Revista ALCONPAT.

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

Esta edición de V10N3 comienza con un trabajo de **México**, donde Laura Vaca Arciga y colegas evalúan el uso de nanopartículas base silicio (NS) y funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial (ST) preventivo emergente en especímenes de concreto reforzado. Los especímenes fueron fabricados con una relación agua/cemento (a/c) de 0.65 y sometidos a un periodo de envejecimiento previo mediante la exposición a CO₂. Posteriormente, dos diferentes variantes del tratamiento fueron aplicadas mediante aspersión (usando una dispersión de 0.1% de nanopartículas en agua) y después fueron sometidas nuevamente a carbonatación. Los resultados de profundidad de carbonatación y ángulo de contacto indican que existe una influencia entre el grado de envejecimiento y la eficiencia de cada tratamiento.

En el segundo trabajo, desde **Brasil**, Guido Lessa Ribeiro Filho y colegas evalúan el impacto de la variación del grosor de la película de pintura seca (GPS) sobre la corrosión subpelicular en láminas de acero del piso de una plataforma petrolera. Se prepararon cupones de prueba (CP) con el esquema de pintura y material del proyecto, con variación de GPS, exposición en una cámara de niebla salina y comparación con la situación real de campo. Los resultados indicaron que la corrosión iniciada en el daño de la película puede ganar mayor importancia que la corrosión por permeación a través de aquella, inclusive en los lugares de GPS bajo, aunque sea continuo. En los CPs con contaminación previa del sustrato, hubo manifestaciones patológicas de ampollas osmóticas. La corrosión subpelicular de la ruptura de la película de campo se produjo a una intensidad similar a la de los CPs probados.

En el tercer artículo, de **Brasil**, Emerson Felipe Felix y colegas presentan la modelización y análisis de los efectos de la corrosión por carbonatación en elementos de concreto reforzado a través de un modelo numérico basado en el Método de los Elementos Finitos. Ante los resultados obtenidos se constató que, dependiendo del nivel de corrosión de las armaduras, el elemento de concreto tiene su estado de tensión y deformación alterado. Además, los resultados indican la eficiencia del modelo desarrollado y su aplicabilidad frente a la simulación del comportamiento mecánico del concreto reforzado con corrosión uniforme.

El cuarto trabajo, de Arnulfo Luévanos Rojas y sus colegas de **México**, muestra un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina sometidas a una carga axial y dos momentos flexionantes ortogonales por cada columna que toma en cuenta la presión real del suelo debajo de la zapata, y la metodología se basa en el principio de que la integración de la fuerza de corte es el momento. El diseño actual considera la presión máxima en todos los puntos de contacto. Este modelo se verifica por equilibrio de fuerzas de corte y momentos. La aplicación del modelo se presenta por medio de un ejemplo numérico. Por lo tanto, el modelo propuesto es el más apropiado, ya que genera un mejor control de calidad en los recursos utilizados.

El quinto trabajo en esta edición fue escrito por Ricardo Boni y Paulo Helene, de **Brasil**. Este artículo presenta un estudio de caso sobre los desafíos, el ingenio y las buenas prácticas de construcción involucradas en la ejecución de refuerzos estructurales de encepados de fundación de hormigón armado sobre pilotes metálicos. Los refuerzos estructurales en cuestión se llevaron a cabo en un proyecto con 3 edificios residenciales de aproximadamente 30 pisos cada uno, ubicados cerca del paseo marítimo. Como resultado, se observó que un estudio previo de dosificación para definir el tipo y las características del hormigón a ser utilizado, la ejecución de un hormigonado prototipo, las particularidades del sitio de construcción, la definición previa de los procedimientos de ejecución empleados, así como el monitoreo y el control sistemático de los hormigonados y otros procedimientos de construcción fueron factores determinantes para promover la seguridad y la calidad de los servicios de refuerzo de acuerdo con las premisas de diseño.

En el sexto trabajo, de **Bolivia**, Marina Pacara Copa y colegas discuten el rango horario para optimizar e interpretar los resultados de la termografía infrarroja cuando es utilizada en la detección de daños de pavimentos flexibles. Se realizó un seguimiento de 14 horas continuas (5:00 a.m. a 7:00 p.m.) para cuatro zonas de estudio en una avenida céntrica de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. El seguimiento evidenció un rango horario óptimo para la toma de imágenes termográficas de 11:00 a.m. hasta las 4:00 p.m.; también se constató la visualización del deterioro mediante la colorimetría diferenciada en los termogramas a diferentes horas. Este ensayo permite localizar las áreas en las que se puede efectuar una inspección detallada. Como limitante se tiene su sensibilidad a cambios en las condiciones ambientales.

En el séptimo trabajo, de **Brasil**, Wildson Wellington Silva y Eliana Cristina Barreto Monteiro identifican las manifestaciones patológicas y los riesgos de los soportes de los aparatos de aire acondicionado de hormigón armado en los edificios, dado el gran número de derrumbes parciales o totales en los edificios. Los datos fueron recogidos por el software 3D y consolidados en el terreno. De los 61 edificios analizados, el 48% son de tipo ventana, que, en una situación de degradación y caída, pueden llegar al suelo con un impacto del orden de toneladas. En las regiones costeras, se añaden los efectos acelerados de la corrosión de las armaduras, como la alta humedad, la contaminación por vehículos de motor y la región marina. Se concluye que estos soportes no tienen diseños estructurales adecuados, lo que, unido a la baja

calidad y a los efectos aceleradores de la corrosión de las armaduras, hace que no sean capaces de recuperarse.

El octavo y último artículo que cierra esta edición está escrito por Luciani Somensi Lorenzi y colegas de **Brasil**. Ellos afirman que los ensayos de la ABNT NBR 15575:2013 hacen parte del conocimiento del sector de la construcción civil, pero el ensayo de acción de calor y choque térmico es innovador, y no posee un histórico consolidado. El objetivo de la investigación es analizar el ensayo críticamente y presentar propuestas. Los resultados demostraron que el ensayo es bastante impreciso en la descripción del procedimiento y equipos. Fueron propuestos ajustes e innovaciones al ensayo para proporcionar resultados más fidedignos. Sin embargo, no fueron realizadas propuestas en cuanto a la inspección visual y a los números de ciclos. Se concluye que la falta de información del ensayo tiene responsabilidad directa en los resultados y que las propuestas sugeridas tienen potencial para ser incorporadas.

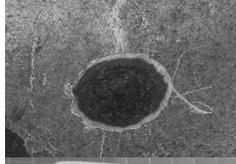
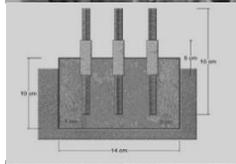
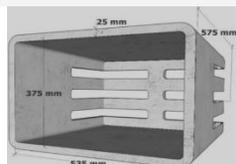
En este número se publican tres artículos que por su originalidad y aportaciones fueron distinguidos en el Congreso CONPAT 2019 con los premios A (Patología de la construcción) y B (Reparación de la construcción), que recayeron en los trabajos de Laura Vaca et al (México), Ricardo Boni y Paulo Helene (Brasil), y Mariana Pacara et al (Bolivia). Estos trabajos fueron sometidos a evaluación adicional por parte de la Revista Alconpat, proceso coordinado por el Co-Editor en Jefe de la RA (Dr. Francisco Alonso Farrera).

Confiamos en que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con preguntas relacionadas con la ciencia y la tecnología del concreto. Agradecemos a los autores por participar en este tema, y por su disposición y esfuerzo para presentar artículos de alta calidad y cumplir con los plazos establecidos.

En nombre del Comité Editorial

Pedro Castro Borges

Editor en Jefe



CONTENIDO

INVESTIGACIÓN BÁSICA

L. Vaca-Arciga, D. Cruz-Moreno, G. Fajardo-San Miguel, R. Orozco-Cruz, F. Tienda: Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación. 274 - 285

G. L. Ribeiro Filho, R. A. J. Ribas, G. D. Paula: Importancia de la corrosión subpelicular por discontinuidad de la película de pintura en estructuras de acero. 286 - 299

E. F. Felix, R. Carrazedo, E. Possan, E. S. Ramos: Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme. 300 - 316

A. Luévanos Rojas, S. López Chavarría, M. Medina Elizondo, R. Sandoval Rivas, O. M. Farías Montemayor: Un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina. 317 - 335

CASO DE ESTUDIO

R. Boni, P. Helene: Control del hormigón de refuerzo de encepados de fundación sobre pilotes metálicos – Estudio de caso. 336 - 349

M. Pacara-Copa, J. H. A. Rocha, J. S. Ledezma Perez: Análisis de la variabilidad horaria para la detección de daños en pavimentos flexibles usando termografía infrarroja. 350 - 363

INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

L. S. Lorenzi, K. J. Stein, L. C. P. Silva Filho: Análisis crítico y propuestas de innovación al método de ensayo de acción de calor y choque térmico a luz de la ABNT NBR 15575 (2013). 364 - 376

W. W. Silva, E. C. B. Monteiro: Las manifestaciones patológicas y los riesgos de los protectores de aparatos de aire acondicionado en edificaciones. 377 - 393

Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación

L. Vaca-Arciga¹ , D. Cruz-Moreno¹ , G. Fajardo-San Miguel^{1*} ,
R. Orozco-Cruz² , F. Tienda¹

*Autor de Contacto: gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.487>

Recepción: 11/05/2020 | Aceptación: 05/08/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Este estudio, tiene como objetivo evaluar el uso de nanopartículas base silicio (NS) y funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial (ST) preventivo emergente en especímenes de concreto reforzado. Los especímenes fueron fabricados con una relación agua/cemento (a/c) de 0.65 y sometidos a un periodo de envejecimiento previo mediante la exposición a CO₂. Posteriormente, dos diferentes variantes del tratamiento fueron aplicadas mediante aspersión (usando una dispersión de 0.1% de nanopartículas en agua) y después fueron sometidas nuevamente a carbonatación. Los resultados de profundidad de carbonatación y ángulo de contacto indican que existe una influencia entre el grado de envejecimiento y la eficiencia de cada tratamiento.

Palabras clave: tratamiento superficial; prevención; Nano SiO₂; concreto, carbonatación.

Citar como: Vaca-Arciga, L., Cruz-Moreno, D., Fajardo-San Miguel, G., Orozco-Cruz, R., Tienda, F. (2020), "Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación", Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 274 – 285, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.487>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, FIC-UANL, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Unidad Anticorrosión, Boca del Río, Veracruz, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor L. Vaca-Arciga contribuyó con la conceptualización de la actividad, la investigación, la metodología, la recopilación de datos y la redacción: borrador original. El autor D. Cruz-Moreno contribuyó a la discusión de la actividad de resultados, validación, redacción, revisión y edición. El autor G. Fajardo-San Miguel contribuyó con la idea original, supervisión de actividades, recursos, adquisición de fondos, redacción, revisión y edición. El autor R. Orozco-Cruz contribuyó con la investigación de la actividad y el análisis formal. El autor F. Tienda contribuyó con la investigación de la actividad, la metodología y la recopilación de datos.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Use of nano-SiO₂ as a preventive maintenance surface treatment in concrete aged by carbonation

ABSTRACT

This study aims to evaluate the use of silicon base (NS) and functionalized (NF) nanoparticles as emerging preventive surface treatment (ST) in reinforced concrete specimens. The specimens were fabricated with a water/cement (w/c) of 0.65 and subjected to a previous aging period through exposure to CO₂. Subsequently, two different variants of the treatment were applied by spraying (using a 0.1% dispersion of nanoparticles in water) and then re-applied to carbonation. The carbonation depth and contact angle results indicate that there is an influence between the degree of aging and the efficiency of each treatment.

Keywords: surface treatment; prevention; Nano SiO₂; concrete; carbonation.

Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial para mantención preventiva em concreto envelhecido por carbonatação

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar a utilização de nanopartículas à base de silício (NS) e funcionalizadas (NF) como tratamento preventivo de superfície (ST) emergente em corpos de prova de concreto armado. As amostras foram fabricadas com uma relação água/cimento (a/c) de 0,65 e submetidas a um período de envelhecimento prévio por exposição ao CO₂. Posteriormente, duas variantes diferentes do tratamento foram aplicadas por pulverização (utilizando uma dispersão de 0,1% de nanopartículas em água) e, em seguida, submetidas à carbonatação novamente. Os resultados de profundidade de carbonatação e ângulo de contato indicam que existe uma influência entre o grau de envelhecimento e a eficiência de cada tratamento.

Palavras-chave: tratamento superficial; prevenção; Nano SiO₂; concreto; carbonatação.

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción, el concreto reforzado se ha convertido en el material más utilizado a nivel mundial, debido a su bajo costo, facilidad y rapidez de fabricación, sin olvidar la combinación de las altas resistencias a compresión que brinda el concreto y las propiedades mecánicas del acero que lo hacen el material compuesto ideal para aplicaciones estructurales (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

El deterioro en las estructuras de concreto reforzado (ECR) provocado por la corrosión del acero de refuerzo ha sido tema de estudio en las últimas décadas. Algunos especialistas (Hernández-Castañeda y Mendoza-Escobedo, 2006; Polder, Peelen y Courage, 2012; Angst, 2018) lo consideran el mayor desafío al que se enfrenta la ciencia y la tecnología a nivel mundial en la industria de la construcción. La importancia recae desde la parte técnica, económica y social que causa la durabilidad de las ECR, principalmente cuando el acero de refuerzo se expone ante ambientes agresivos. Es el caso de la exposición a los cloruros, ya sea provenientes de la materia prima del concreto o por la penetración desde el entorno que lo rodea. O bien, por la carbonatación del concreto que es otra de las causas de la corrosión del refuerzo de dichas estructuras.

Más del 50% de los ECR en servicio presentan problemas de deterioro a causa de la alta permeabilidad o baja calidad del concreto. Las pérdidas directas debidas a los costosos trabajos de mantenimiento, y principalmente a los trabajos de reparación de estructuras en todo el mundo, han sido económicamente mayores, especialmente en los países del primer mundo (Alhozaimy et al., 2012). Actualmente, se generan gastos anuales entre 18 y 21 mil millones de dólares en rehabilitaciones o reparaciones de ECR debido a la corrosión del acero de refuerzo. (Beushausen y Bester, 2016). El acero de refuerzo está protegido ante el proceso de corrosión por la alcalinidad del concreto, que es el resultado del proceso de hidratación del cemento. El pH decrece cuando el proceso físico-químico de carbonatación ocurre. La carbonatación sucede por la reacción entre CO_2 y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produciendo CaCO_3 (1). Como resultado, el CaCO_3 precipita reduciendo el pH en el concreto disminuyendo significativamente la durabilidad del concreto armado y su vida útil.



La aplicación de tratamientos superficiales (TS) en concreto ha sido ampliamente investigada en las últimas décadas. (Pigino *et al.*, 2012; Pan, *et al.*, 2017b; Vivar *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2018). Son métodos económicos y efectivos para mejorar la calidad del concreto de la zona superficial y para proteger las ECR comparada con otros métodos (i.e.: la disminución de la relación agua/cemento y el uso de adiciones puzolánicas, el incremento del espesor del recubrimiento, etc.). La mayoría de los TS pueden reducir la permeabilidad al agua en el concreto, específicamente la impregnación hidrofóbica, que se ha logrado con el uso de silanos y siloxanos, que evita la entrada de agua sin presión hidrostática. Para retrasar el avance de la carbonatación, el tratamiento a base de silicato tiene una protección más efectiva que el silano y el siloxano; estos apenas impiden la entrada de CO_2 (Pan, *et al.*, 2017a).

Hoy en día, el uso de nanomateriales como productos para la protección indirecta (sobre concreto) del acero ha sido ampliamente estudiado, demostrando en algunos casos que pueden mejorar el rendimiento de los materiales de construcción. Particularmente en concreto, el desarrollo de propiedades inteligentes que tienen la capacidad de autolimpiarse, antimicrobianas, hidrofóbicas, súper hidrofóbicas, así como el aumento de las propiedades mecánicas. (Sobolev et al., 2008; Jalal et al., 2012; Kupwade-patil y Cardenas, 2013; Fajardo et al., 2015)

El uso de nanopartículas a base de silicio a edades tempranas ha promovido un aumento en la resistividad eléctrica de la matriz cementante, una disminución en el grado de penetración de CO_2 y una disminución en la permeabilidad. (Cruz-Moreno et al., 2017). Mientras que el uso de

nanopartículas funcionalizadas, como las nanopartículas de sílice funcionalizadas, ha permitido el desarrollo de superficies con propiedades super hidrofóbicas, autolimpiables y bactericidas. (Zhi et al., 2017; Cruz-Moreno, 2019).

Se ha estudiado la influencia del uso de TS para proteger la degradación de concretos envejecidos, aportando propiedades hidrofóbicas y consolidantes. (Shen et al., 2019). Para obtener resultados a largo plazo, se realizaron pruebas de envejecimiento acelerado. Donde se ha encontrado una disminución en el avance de la carbonatación, una hidrofobicidad estable y a pesar de una disminución progresiva de su rendimiento con el paso del tiempo, el efecto residual suele otorgar una mejor vida útil para el concreto (Christodoulou et al., 2013; Creasey et al., 2017).

El presente trabajo tiene como objetivo, el analizar el efecto y desempeño que causa la aplicación de nanopartículas de sílice funcionalizadas (NF) y sin funcionalizar (NS) en superficies de concreto con cierto grado de envejecimiento. Por un lado, la NF brindará un efecto hidrofóbico y, por otro, la NS un efecto bloqueador de poro. La aplicación de las NS y NF es de forma superficial por medio de aspersión de baja presión. Este trabajo se enfocó en evaluar el uso de nanopartículas base sílice (NS) y nanopartículas base sílice funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial para métodos de mantenimiento preventivo en el deterioro de ECR ante ambientes ricos en CO₂.

2. PROCEDIMIENTO

A continuación, se describe el desarrollo experimental del diseño, fabricación de los especímenes, obtención de las nanopartículas y finalizando con el medio de envejecimiento a CO₂, con el objetivo de estudiar el efecto generado de las nanopartículas NS y NF como agentes externos en un tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concretos. Este estudio se dividió en etapas, para tener un mejor conocimiento acerca del comportamiento y los efectos de las nanopartículas en un concreto envejecido.

2.1 Producción de nanopartículas base silicio (NS y NF)

Las nanopartículas de silicio (NS y NF) se obtuvieron mediante síntesis sol-gel, siguiendo el procedimiento detallado en (Cruz-Moreno, 2015, 2019). A continuación se describe un resumen de su proceso de síntesis.

Se utilizó tetraetilortosilicato TEOS, como precursor de la sílice, alcohol etílico como solvente, agua desionizada, hidróxido de amonio como catalizador y para la funcionalización de las NS, se utilizó un 1,1,3,3 - tetrametildisiloxano como modificador superficial y ácido nítrico como agente deshidratante.

El procedimiento para la síntesis consistió en colocar el alcohol etílico con una agitación vigorosa a 70°C. Una vez alcanzada esta temperatura, se incorporó el TEOS y se mantuvo la agitación y temperatura por 30 min. Enseguida se adicionó el hidróxido de amonio dejándolo reaccionar por 30 min más. Posteriormente, se adicionó lentamente el agua y se dejó reaccionar por 60 min más. Después, gota a gota, se añadió un exceso de hidróxido de amonio hasta lograr la formación de un gel transparente. Una vez cumplido 24 h, se procedió a colocarlo en un horno a 110 °C por 24 h más, con el fin de evaporar la mayor de cantidad de solvente y agua sobrantes.

Para la obtención de las NF se llevó a cabo durante el proceso de síntesis sol-gel de las NS, donde la funcionalización se realizó a partir de la adición del agua destilada y hasta el término del tiempo de reacción de 60 min. A partir de este momento, se incorporó el 1,1,3,3 - tetrametildisiloxano lentamente y se dejó reaccionar por 120 min para su posterior deshidratación y modificación superficial al incorporar el ácido nítrico a la reacción. Después, se adicionó cuidadosamente gota a gota el hidróxido de amonio, dejando reaccionar por 24 h, al término del tiempo se procedió a colocarlo al horno a 110 °C por 24 h.

2.2 Fabricación de las muestras

Se elaboraron especímenes con Cemento Portland Ordinario (conocido como CPO 40, de acuerdo con NMX-C-414-ONNCCE), la proporción se diseñó de acuerdo con la norma ACI 211, utilizando una relación agua/cemento de 0.65, lo cual es habitual en la industria de la construcción, véase Tabla 1.

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla de concreto propuesto (ACI 211, PCA).

Rel. a/c	Cemento kg /m ³	Grava kg /m ³	Arena kg /m ³	Agua kg /m ³	Resistencia a la compresión MPa	Porosidad accesible al agua (%)
0.65	330	756	918	215	32	11.25

Para las pruebas de resistencia a la compresión y porosidad accesible al agua se elaboraron especímenes cilíndricos de dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M. Posteriormente siguieron un periodo de curado estándar (como indicado en ASTM C-231) para después ser ensayados.

De acuerdo con la Asociación de Cemento de Portland (conocida como PCA), uno de los requisitos mínimos de resistencia a la compresión recomendados para brindar protección al elemento de concreto en diferentes ambientes de exposición es de 25 MPa, con esto se indica que la mezcla cumple con la recomendación de protección, mientras que la porosidad accesible al agua es de 11.25% indicando que el ingreso de Cl⁻ será alto.

El seguimiento de la carbonatación se llevó a cabo en prismas de concreto con dimensiones de 10 cm x 10 cm x 30 cm. El curado fue con rocío continuo de agua a 20°C y 100% de humedad relativa, donde permanecieron por 28 días.

2.3 Envejecimiento por exposición a CO₂

Al finalizar el curado de los especímenes, estos fueron sometidos a un ambiente rico en CO₂ hasta obtener profundidades de carbonatación que representen diferentes condiciones de envejecimiento previo a la aplicación del tratamiento con NS y NF. Para ello, se seleccionaron tres diferentes profundidades de carbonatación como envejecimiento inicial. Tomando en cuenta que el recubrimiento promedio de las ECR es de 20 mm, se consideraron un 0%, 25% y 50% de carbonatación sobre los especímenes. Es decir, la primera serie es aquella que presenta una profundidad de carbonatación de 0 mm, la segunda serie 5 mm y la tercera serie 10 mm. Las condiciones de exposición fueron: una atmósfera de 8% de CO₂ en aire, 60% ±10% HR, a 30°C.

2.4 Aplicación de tratamientos con NS y NF

Se preparó una dispersión con una dosis de 0.1% de nanopartículas con respecto al volumen de agua, se utilizó una agitación magnética y a 60 °C durante un período de 1 h, con la finalidad de facilitar la dispersión de las NS, evitando la precipitación y la aglomeración. Para el uso de la NF solo fue necesario la agitación magnética sin el uso de temperatura. A cada etapa de envejecimiento se aplicaron 2 tratamientos superficiales: a) dispersión con NS y b) dispersión con NF. Todos los tratamientos están referenciados con una serie control sin tratamiento (llamada aquí, REF). Antes de la aplicación, todos los especímenes tuvieron una preparación, la cual consistió en llevar a cabo una limpieza de la superficie para retirar el polvo, grasa o manchas. Se prepararon las dispersiones para cada tratamiento, y por medio de un atomizador se roció homogéneamente sobre toda la superficie del espécimen, dejando un reposo de 30 min para la aplicación de una segunda capa. Al término de la aplicación, los especímenes se mantuvieron durante 14 días en condiciones de

laboratorio para promover la reacción entre las NS y la matriz cementante. (Fajardo et al., 2015; Cruz-Moreno, 2019). Una vez cumplido este tiempo, todos los especímenes fueron reexpuestos a CO₂ utilizando las condiciones descritas en 2.3 para promover el avance de la carbonatación.

3. MÉTODOS

3.1 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm como indicado en ASTM C 39 usando prensa hidráulica. La mezcla fue diseñada de acuerdo con la norma ASTM C 192/192 M para una resistencia de 30 MPa.

3.2 Ángulo de contacto (AC)

Con el objetivo de evaluar el efecto hidrofóbico que confiere el NF ante las exposiciones de envejecimiento acelerado, se determinó la hidrofobicidad generada en la superficie del concreto. Esta, fue determinada mediante la medición del ángulo de contacto a diferentes edades de envejecimiento siguiendo la norma ASTM D 5725 en un analizador de forma de gota KRÜSS modelo DSA25 a 23 ° C. La Tabla 2 muestra la clasificación de las superficies según el ángulo θ obtenido.

Tabla 2. Clasificación de las superficies en función de los ángulos observables θ máximo y mínimo.

Hidrofílico	Hidrofóbico	Super hidrofóbico
$\theta_{min}^{max} < 90^\circ$	$\theta_{min}^{max} \begin{matrix} < 150^\circ \\ > 90^\circ \end{matrix}$	$\theta_{min}^{max} < 150^\circ$

Se tomaron mediciones de cinco gotas de agua para inyección (2 μ l) por muestra y se tomó una imagen de inmediato. Luego, se analizó con la ayuda del software ADVANCE V 1.9.2.3 y se determinó el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie. Se utilizaron las mismas muestras para determinar el avance de carbonatación después de realizar las mediciones de fenolftaleína. La parte evaluada fue en la superficie donde se aplicaron los tratamientos, y se midió a las mismas edades de reexposición, como se puede observar en la Figura 1.

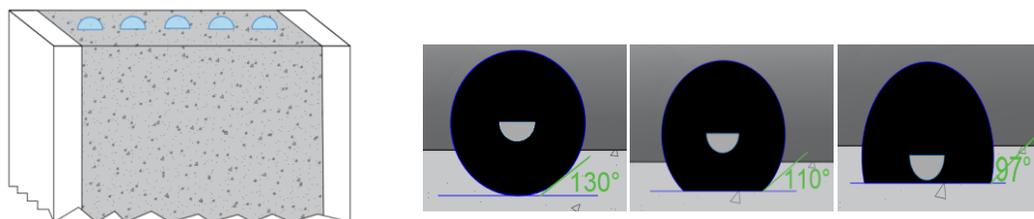


Figura 1. Esquema de la forma en que se realizaron las mediciones de AC en las muestras reexpuestas.

3.3 Medición del avance de la carbonatación

Para la medición del avance de la carbonatación se utilizó la fenolftaleína como indicador convencional. Donde el color rosa que otorga es un indicador de un concreto en buenas condiciones, es decir que aún no presenta problemas de carbonatación. La Figura 2 ilustra el avance de carbonatación para la muestra de concreto con y sin tratamientos. Para las mediciones se utilizó el programa Image J y una regla graduada como referencia de la escala, se realizaron 10 mediciones por lado carbonatado del espécimen, teniendo 3 especímenes por tratamiento.

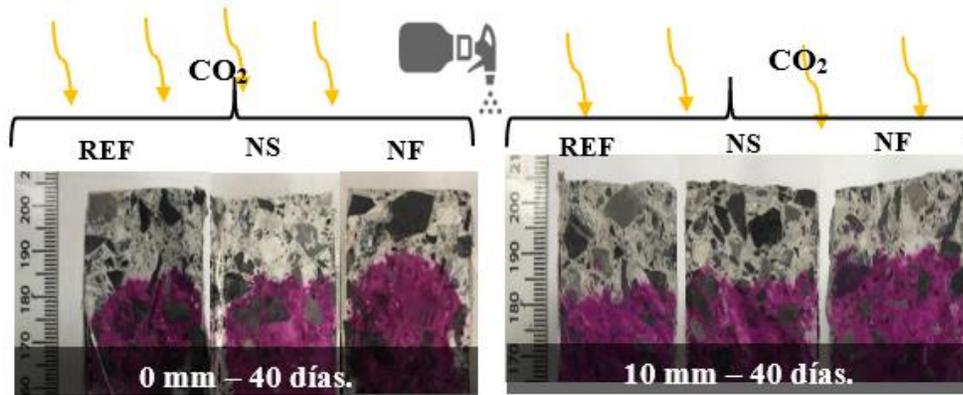


Figura 2. Avance de la carbonatación en muestras de 0 y 10 mm de carbonatación inicial a los 40 días de reexposición, medida con fenolftaleína.

4. RESULTADOS

4.1 Ángulo de contacto

En la Figura 3 se muestran los resultados de los especímenes REF y NF, en los cuales se realizó un seguimiento del ángulo de contacto con el objetivo de conocer el comportamiento del desarrollo de la hidrofobicidad en la superficie del concreto. Las mediciones se realizaron en especímenes sin envejecimiento previo durante más de 1000 h posterior a la aplicación del tratamiento. Se puede observar que la muestra REF tuvo un comportamiento prácticamente constante, con un ángulo de contacto promedio de 26.9°. Por su parte las muestras con tratamiento NF tuvieron un comportamiento uniforme a partir de las 96 h después de la aplicación, alcanzando un ángulo máximo de 123.7°. De acuerdo con estos resultados, a partir de las 24 h la superficie paso de ser hidrofílica a hidrofóbica; y alrededor de las 96 h, la NF tiene un AC estable en el concreto.

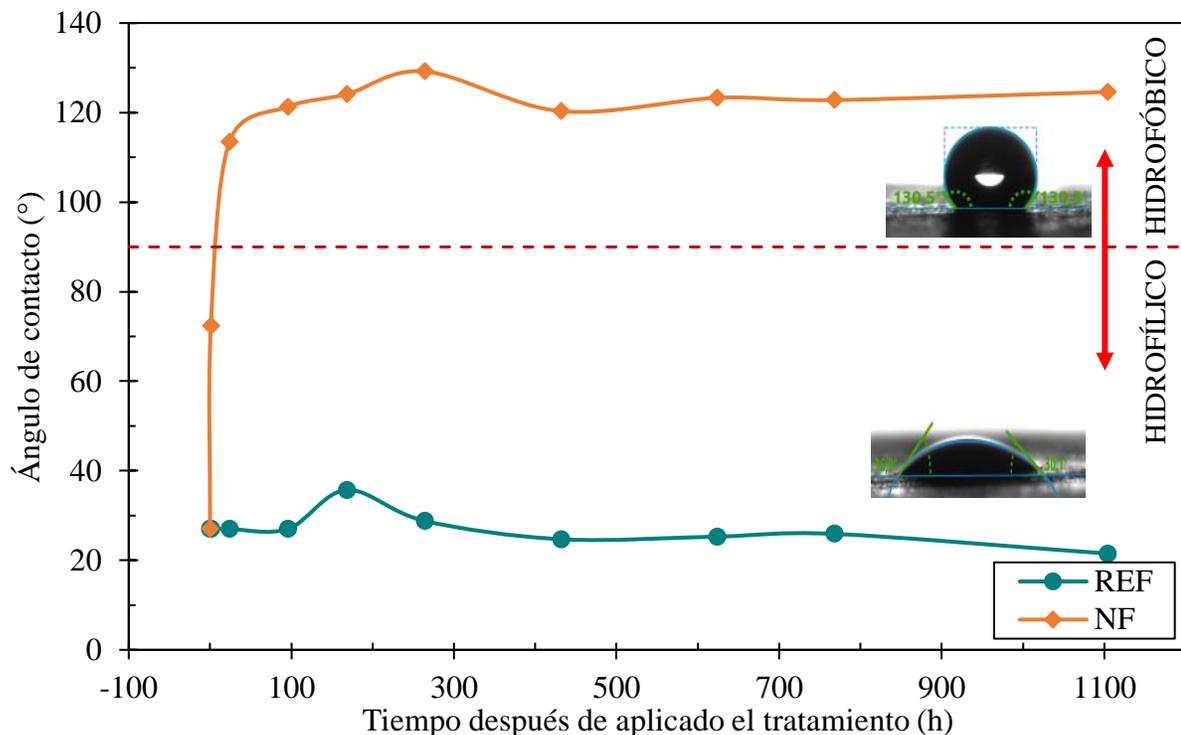


Figura 3. Comportamiento del ángulo de contacto en muestras con tratamientos NF horas después de la aplicación.

En la Figura 4 se presenta el seguimiento del AC, en los especímenes tratados y con los envejecimientos iniciales preseleccionados, a diferentes edades de reexposición al CO₂. Los especímenes NS tuvieron un comportamiento similar al de la referencia, lo cual era esperado ya que este tratamiento de nanopartículas base silicio no proporcionan un efecto hidrofóbico.

Por su parte, el AC en los especímenes tratados con NF es prácticamente constante indicando que la hidrofobicidad se mantiene durante el tiempo de exposición, independientemente del grado de envejecimiento inicial. En la Figura 4.A, la NF presenta el mayor AC en comparación de las demás series, encontrándose en rangos entre 120-130°. Esta preservación del ángulo puede ser atribuida a que, la modificación superficial del concreto debida al proceso de carbonatación, no afectó el comportamiento de los radicales CH₃, principales responsables de la hidrofobicidad de la superficie.

En la Figura 4.B y 4.C, se presentan los resultados obtenidos de especímenes con un envejecimiento de 5 mm y 10 mm de carbonatación. En ambos casos, se puede constatar que el AC se mantuvo en un rango entre 115 y 120°, pero sin mostrar una tendencia clara. Basado en lo anterior, se puede concluir que el envejecimiento producido por exposición a un ambiente de CO₂ no afecta el comportamiento de ángulo de contacto, y por ende el desarrollo de la hidrofobicidad.

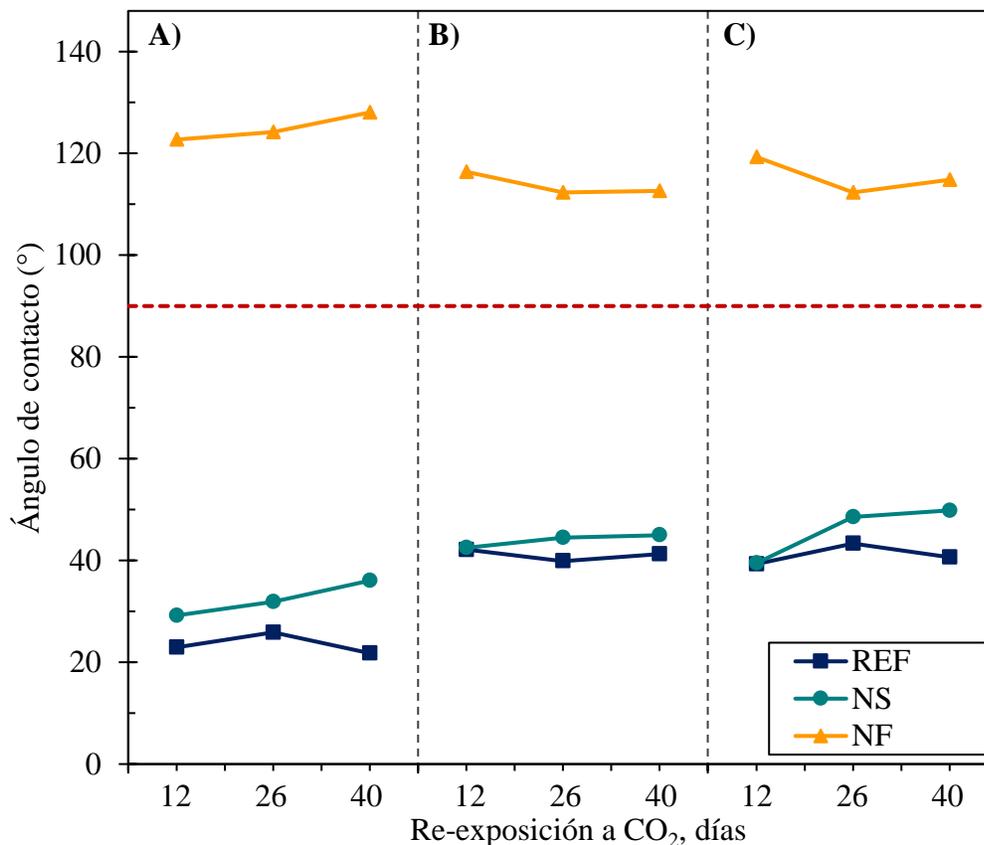


Figura 4. Variación del ángulo de contacto de especímenes con un envejecimiento inicial de A) 0 mm, B) 5 mm y C) 10 mm de carbonatación, después de la reexposición a carbonatación.

4.2 Profundidad de carbonatación

En la Figura 5, se presentan los resultados del avance de carbonatación de los tratamientos superficiales NS y NF, incluyendo la serie sin tratamiento (REF). Se puede observar como la serie sin tratamiento tiende a una mayor profundidad de carbonatación en comparación con las muestras tratadas, independiente del grado de envejecimiento.

De manera específica, en la Figura 5.A, se constata hacia el final del periodo de prueba, hasta un 36% de disminución en la profundidad de carbonatación en los especímenes tratados con NS, en comparación con las muestras REF. Mientras que el tratamiento con NF obtuvo un 22% de reducción. Esto se atribuye a la formación de compuestos hidratados producto de la reacción de las nanopartículas con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, obteniendo una mayor cantidad de geles que conlleva a la reducción de permeabilidad. Estos resultados concuerdan con la literatura, en donde el uso de la NS generan un efecto barrera que mejora la resistencia del ingreso de agentes agresivos (Pigino *et al.*, 2012; Pan, *et al.*, 2017b). Por su parte, el tratamiento con NF, produce un efecto hidrofóbico en la superficie del concreto, lo cual le otorga la capacidad de ceder el paso de gases como el CO_2 a su interior, pero deteniendo el ingreso del agua mediante la repulsión de las moléculas de O-H, por ejemplo, las cuales son necesarias para generar las reacciones del proceso de carbonatación.

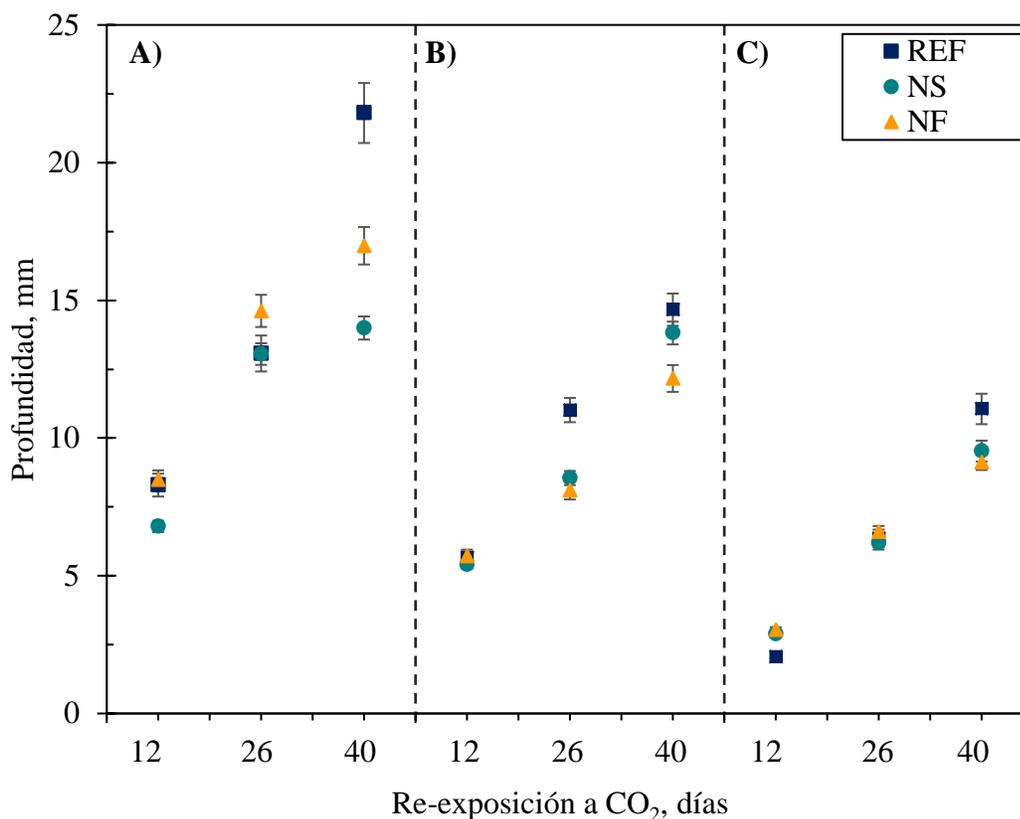


Figura 5. Profundidad de carbonatación en probetas con A) 0 mm B) 5 mm y C) 10 mm de carbonatación antes de la aplicación del tratamiento.

En la Tabla 1 se presentan los valores de la reducción del avance de carbonatación de los especímenes con los diferentes tratamientos, obtenidos al final del período de reexposición. El porcentaje de reducción (%Red) se obtuvo mediante la ecuación (2) establecida por Fajardo et al. (Fajardo et al., 2015).

$$\%Red = (1 - (X_{TRAT}/X_{REF})) * 100... \quad (2)$$

Dónde:

%Red= la reducción de la profundidad de carbonatación (vs REF)

X_{TRAT} = la profundidad de carbonatación de las muestras con tratamiento (mm)

X_{REF} = la profundidad de carbonatación de las muestras sin tratamiento (mm)

Tabla 3. Porcentaje de reducción de carbonatación vs REF de muestras tratadas con NS y NF; expuesto a un ambiente agresivo con un 8% de CO₂ a los 40 días.

Carbonatación inicial	%RED	
	NS	NF
0 mm	36	22
5 mm	4	13
10 mm	7	7

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 3, todos los tratamientos utilizados presentan un porcentaje de reducción mayor en los concretos con un envejecimiento inicial de 0 mm, en comparación con las series de 5 y 10 mm de envejecimiento. Se puede observar claramente que el grado de envejecimiento tiene un efecto sobre el desempeño de los tratamientos. Estos resultados son similares a los encontrados en la literatura, con la diferencia que la aplicación de tratamientos superficiales se realizó en edades tempranas, incluso durante los primeros días después de la fabricación. Por un lado, Franzoni.(Franzoni, Pigino y Pistolesi, 2013) encontró que el uso de la nano sílice tiene un efecto de reducción de la penetración de la carbonatación alrededor de 14-47%. Por su parte, Ibrahim (Ibrahim et al., 1999) encontró que los tratamientos superficiales de base silanos/siloxanos presentaron una reducción de alrededor de 20% en la penetración de la carbonatación.

Los resultados obtenidos aquí, permiten concluir que el grado de envejecimiento del concreto ejerce una disminución en el desempeño de los tratamientos ante la re-exposición al CO₂. De esta manera, se recalca la importancia de llevar a cabo una evaluación y diagnóstico de la estructura para estar en condiciones de realizar una selección del tratamiento. En el caso de estructuras sometidas a ambientes industriales o bien urbano industriales, el tratamiento con nanopartículas NS y NF podría ser una opción factible cuando se aplica a edades tempranas.

5. CONCLUSIONES

- El tratamiento con NF logró una mayor hidrofobicidad y estabilidad a partir de las 96 horas.
- En los especímenes de 0 mm, se puede atribuir la pérdida de AC a una posible modificación que genera la carbonatación entre los radicales CH₃, logrando perder la hidrofobicidad. El efecto del envejecimiento inicial de 5 y 10 mm no afectó a la hidrofobicidad en la superficie mediante el uso del tratamiento con NF. El tratamiento con NF, obtuvo los mejores resultados, tanto en carbonatación como en AC.
- En cuanto al envejecimiento acelerado por CO₂, se observa que el tratamiento NS no muestra resultados esperados, ya que las NS tienen la limitante de Ca(OH)₂ que se consume en el proceso de carbonatación.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a CONACYT por el apoyo financiero de los proyectos CB-2016/285453 y F0003-301307. L. Vaca-Arciga agradece a CONACYT por la beca otorgada (889469) para la realización de sus estudios de Posgrado. Especial agradecimiento al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción, Departamento de Ecomateriales y Energía y al Departamento de Tecnología del Concreto por el apoyo brindado en el desarrollo del presente estudio.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, A. M. and Mejía de Gutiérrez, R. (2013) “*Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*”, *Materiales de Construcción*, 63(309), pp. 7–38. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>.
- Alhozaimy, A., Hussain, R. R., Al-Zaid, R., Al-Negheimish, A. (2012) “*Investigation of severe corrosion observed at intersection points of steel rebar mesh in reinforced concrete construction*”, *Construction and Building Materials*. 37, pp. 67–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.011>.
- Angst, U. M. (2018) “*Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete*”, *Materials and Structures*. Springer Netherlands, 51(4). doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>.
- Beushausen, H. and Bester, N. (2016) “*The influence of curing on restrained shrinkage cracking of bonded concrete overlays*”, *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 87, pp. 87–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.007>.
- Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A., Webb, J., Glass, G. K. (2013) “*Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane*”, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 48, pp. 708–716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.038>.
- Creasey, R., Andrews, J. P., Ekolu, S. O., Kruger, D. (2017) “*Long-term 20-year performance of surface coating repairs applied to façades of reinforced concrete buildings*”, *Case Studies in Construction Materials*, 7, pp. 348–360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.001>.
- Cruz Moreno, D. M., Fajardo San Miguel, G. D. J., Flores Vivián, I., Cruz López, A., & Valdez Tamez, P. L. (2017). *Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland*. Revista ALCONPAT, 7(3), 274 - 285. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>
- Cruz-Moreno, D. M. A. (2015) *Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio*. Tesis de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/4554>.
- Cruz-Moreno, D. M. A. (2019) *Superficies multifuncionales en materiales de construcción base cemento portland obtenidas durante el curado con nanopartículas funcionalizadas*, Tesis de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18517>.
- Fajardo, G., Cruz-López, A., Cruz-Moreno, D., Valdeza, P., Torres, G., Zanella, R. (2015), “*Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials*”, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 76, pp. 158–167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.054>.
- Franzoni, E., Pigino, B. and Pistolesi, C. (2013) “*Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments*”, *Cement and Concrete Composites*, 44, pp. 69–76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.008>.
- Hernández-Castañeda, O. and Mendoza-Escobedo, C. J. (2006) ‘*Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*’, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(1), pp. 57–70. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2006.07n1.005>.
- Hou, P., Li, R., Li, Q., Lu, N., Wang, K., Liu, M., Cheng, X. and Shah, S. (2018) ‘*Novel superhydrophobic cement-based materials achieved by construction of hierarchical surface structure with FAS/SiO₂ hybrid nanocomposites*’, *Engineered Science Materials & Manufacturing*. doi: <https://doi.org/10.30919/esmm5f125>.

- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M. and Dakhil, F. H. (1999), “*Use of surface treatment materials to improve concrete durability*”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, Issue 1. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(36))
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. and Pouladkhan, A. R. (2012), “*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*”, Materials and Design. Elsevier Ltd, 34, pp. 389–400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037>.
- Kupwade-patil, K. and Cardenas, H. E. (2013), “*Electrokinetic nanoparticle treatment for corrosion remediation on simulated reinforced bridge deck*”, Journal of Nanoparticle Research, 15 (1952). doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1952-3>.
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.-C. and Li, N. (2017a) ‘*A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms*’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 132, pp. 578–590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>.
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.-C. and Li, N. (2017b) ‘*A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance*’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 133, pp. 81–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>.
- Pigino, B., Leemann, A., Franzonia, E. and Lura, P. (2012) ‘*Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance*’, Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd, 34(3), pp. 313–321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021>.
- Polder, R. B., Peelen, W. H. A. and Courage, W. M. G. (2012) ‘*Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures - Technical and non-technical issues*’, Materials and Corrosion, 63(12), pp. 1147–1153. doi: <https://doi.org/10.1002/maco.201206725>.
- Shen, L., Jiang, H., Wang, T., Chen, K. and Zhang, H. (2019) ‘*Progress in Organic Coatings Performance of silane -based surface treatments for protecting degraded historic concrete*’, Progress in Organic Coatings. Elsevier, 129, pp. 209–216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.016>.
- Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R. and Torres-Martínez, L. M (2008), *Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites*, Symposium Paper, International Concrete Abstracts Portal, American Concrete Institute: ACI Special Publication, 254, pp. 93–120. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.2354&rep=rep1&type=pdf>.
- Vivar Mora, L., Naik, S., Paul, S., Dawson, R., Neville, A. and Barker, R. (2017) *Influence of silica nanoparticles on corrosion resistance of sol-gel based coatings on mild steel*, Surface and Coatings Technology. Elsevier B.V., 324, pp. 368–375. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.063>
- Zhi, J.-H. Zhang, L.-Z., Yan, Y. and Zhu, J. (2017), *Mechanical durability of superhydrophobic surfaces: The role of surface modification technologies*, Applied Surface Science. Elsevier B.V., 392, pp. 286–296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.049>.

Importancia de la corrosión subpelicular por discontinuidad de la película de pintura en estructuras de acero

G. L. Ribeiro Filho^{1*} , R. A. J. Ribas² , G. D. Paula² 

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

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.357>

Recepción: 03/10/2018 | Aceptación: 16/01/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

El trabajo evaluó el impacto de la variación del grosor de la película de pintura seca (GPS) sobre la corrosión subpelicular en láminas de acero del piso de una plataforma petrolera. Se prepararon cupones de prueba (CP) con el esquema de pintura y material del proyecto, con variación de GPS, exposición en una cámara de niebla salina y comparación con la situación real de campo. Los resultados indicaron que la corrosión iniciada en el daño de la película puede ganar mayor importancia que la corrosión por permeación a través de aquella, inclusive en los lugares de GPS bajo, aunque sea continuo. En los CPs con contaminación previa del sustrato, hubo manifestaciones patológicas de ampollas osmóticas. La corrosión subpelicular de la ruptura de la película de campo se produjo a una intensidad similar a la de los CPs probados.

Palabras clave: estructuras; acero; película; pintura; corrosión.

Citar como: Ribeiro Filho, G. L., Ribas, R. A. J., Paula, G. D. (2020), “*Importancia de la corrosión subpelicular por discontinuidad de la película de pintura en estructuras de acero*”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 286 – 299, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.357>.

¹ Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais (IFMG), Belo Horizonte, Brazil.

² Mining School, Federal University of Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Brazil.

Editor asociado responsable de este artículo: Paulo Helene

Contribución de cada autor

En este trabajo En este trabajo, el autor Guido contribuyó con la idea original, coordinación de los experimentos, recolección de datos, análisis y discusión de los resultados y redacción del trabajo. El autor Ribas contribuyó con la orientación del autor, el análisis y discusión de los resultados y la redacción del trabajo. El autor Geraldo contribuyó a la co-orientación de la obra.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

The importance of underpaint corrosion caused by damage to paint on steel structures

ABSTRACT

The impact of varying the dry paint film thickness (DFT) on the underpaint corrosion of steel plates obtained from the floor of an offshore oil platform is evaluated. The specimens were all prepared using the same material and paint scheme, and the DFT and exposure conditions in a salt spray chamber were varied and compared with the results obtained in a real situation. The results indicated that corrosion initiated at sites where the paint was damaged, may be more important than corrosion through the undamaged paint due to permeation, even in cases where the DFT is thin. In specimens whose substrates were previously damaged, there were pathological manifestations of osmotic blistering. The underpaint corrosion that occurred after the paint was damaged in the field occurred at an intensity like that observed for the tested specimens.

Keywords: structures; steel; film; painting; corrosion.

Importância da corrosão subpelicular por descontinuidade da película de pintura em estruturas de aço

RESUMO

O trabalho avaliou impacto da variação da espessura da película seca de pintura (EPS) na corrosão subpelicular em chapas de aço do piso de uma plataforma de petróleo. Foram preparados corpos de prova (CPs) com material e esquema de pintura do projeto, com variação das EPS, exposição em câmara de névoa salina (salt spray) e comparados com situação real. Os resultados indicaram que corrosões iniciadas em danos à película podem ganhar maior importância que corrosões por permeabilidade através da película, mesmo as com baixa EPS, porém contínua. Em CPs com prévia contaminação do substrato, observaram-se manifestações patológicas de empoamento por osmose. A corrosão subpelicular a partir do rompimento da película em campo ocorreu numa intensidade semelhante aos CPs ensaiados.

Palavras-chave: estruturas; aço; película; pintura; corrosão.

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión es un proceso espontáneo de deterioro de los metales que produce alteraciones químicas y/o electroquímicas que tienden a llevarlos a su estado original desprendiendo la energía aplicada en el proceso de metalurgia. El metal corroído, en estado menor de energía, retorna a su estado más primitivo, con pérdida de propiedades adquiridas en el proceso, tales como la resistencia mecánica, elasticidad, ductilidad, estética y otras características, que varían de acuerdo con el tipo de liga. El producto resultante del proceso corrosivo es el propio mineral, es decir, óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, silicatos etc. (Silva, 1981; Ramanathan, 1988; Gentil, 2007; Nunes and Lobo, 2007).

Un factor relevante para la ingeniería en el proceso corrosivo es la velocidad con que la corrosión ocurre. Partiendo del principio de que todo metal puede ser utilizado en cualquier medio, desde que la velocidad de corrosión sea compatible con la aplicación, metales menos nobles pueden tener asegurada su factibilidad económica para determinados usos. Eso hace que el acero sea usado largamente en las estructuras, con la debida protección anticorrosiva, por medio de pintura, revestimiento, galvanizado, metalización, entre otros procesos (Silva, 1981).

La corrosión atmosférica ocurre básicamente por el mecanismo electroquímico. Ese mecanismo es el más frecuente en la naturaleza y se caracteriza por la presencia de agua líquida, temperaturas por debajo del punto de rocío (normalmente temperatura ambiente) y ocurre debido a la formación de pilas electroquímicas, o pilas de corrosión. Así, se entiende que hay un movimiento de electrones de un área del material metálico para otro, por medio de una solución acuosa capaz de conducir electricidad, es decir que es necesario que haya sales o iones diluidos en agua líquida (electrolitos), provocando reacciones de oxidación en un lugar y reducción en otro (Nunes y Lobo, 2007). Las moléculas de agua son polares y se agregan a los iones metálicos del metal en contacto con el electrolito, formando iones (agregados de este metal sin sus electrones de valencia), reacción cuyo resultado es la disolución del metal; es decir la corrosión es una reacción química destructiva entre el metal o combinación metálica y el medio ambiente (Wolynec, 2003; Jones, 1996).

Para ocurrir la corrosión, es necesario que el substrato tenga contacto con el electrolito, de allí la importancia de la protección anticorrosiva en los metales.

De manera general, estructuras en las construcciones industriales, navales y obras civiles utilizan la pintura como forma de protección, que cuando es ejecutada adecuadamente, ofrece buena protección a un costo razonable. El contacto del electrolito con el substrato capaz de iniciar el proceso corrosivo puede ocurrir a través de la película debido a su permeabilidad (causada por fallas en la ejecución de la pintura, como bajo espesor o alta porosidad); por el ataque a la película por agentes corrosivos del medio (causada por la elección incorrecta del tipo de pintura); o por la ruptura de la película de pintura, por daños mecánicos, siendo éste el causante de gran parte de las corrosiones observadas en la plataforma estudiada. La ruptura de la película de pintura elimina la protección por barrera al permitir el contacto del agente corrosivo con el substrato, además de la pérdida de la protección de los inhibidores de corrosión eventualmente presentes en la formulación de la pintura (Chawla y Gupta, 1995).

Para Chawla y Gupta (1995) la pintura ofrece resistencia al paso del agente corrosivo a través de sí misma, reduciendo el movimiento iónico que la permea, pero la resistencia ofrecida no es suficientemente alta para contener la corrosión.

La elección del tipo de pintura y el EPS (espesor de la película seca) debe ser compatible con los agentes corrosivos presentes en el medio, siendo recomendado el espesor de 250µm para atmósferas altamente agresivas, como es el caso de plataformas de petróleo instaladas en ambientes marítimos (Nunes y Lobo, 2007).

En ese contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de la variación del espesor de la película seca de pintura (EPS) en la corrosión subpelicular en láminas de acero del piso de una plataforma de petróleo.

2. METODOLOGÍA

Como metodología, fueron comparadas las corrosiones subpeliculares en probetas (CPs) con el estudio de caso de una plataforma de petróleo. Los CPs, con dimensiones 150mm x 100mm x 6.3mm, fueron preparados con láminas de piso utilizadas en la construcción de la plataforma (acero NV-A36), y aplicado el esquema de pintura previsto en el procedimiento de ejecución de pintura con algunas variaciones de espesor Figura 1. Esos CPs tuvieron daños en sus películas (muescas) y fueron sometidos al ensayo de niebla salina (*salt spray*) por 1550h, para la evaluación de los efectos de la variación del EPS en la corrosión subpelicular.

2.1 Preparación de las Probetas o cuerpos de prueba CPs

Fueron preparados seis grupos de CPs, siendo los grupos de 1 a 5 compuesto por cuatro probetas cada una (denominados A, B, C y D); y el grupo 6 conformado por apenas dos unidades, denominadas A y B. Todos los CPs fueron previamente lavados con agua limpia. Los CPs de los grupos 1 y 2 fueron sometidos previamente a la preparación de la superficie St3 y Sa2½, ISO 8501-1 (ISO, 2007), respectivamente, y la aplicación de sistema de pintura con bajo espesor. Los grupos 3 y 4 fueron sometidos a la preparación de superficie St3 y Sa2½, respectivamente, y a la aplicación del sistema de pintura completo para la zona atmosférica¹ (Tabla 1), según el procedimiento de pintura del proyecto, que prevé espesor de película seca (EPS) entre 445µm y 600µm, medida a cada capa. Antes de la pintura, todos los CPs de preparación Sa2½ tuvieron medición de la rugosidad luego la preparación, para verificar que coincidiera en el intervalo 50µm a 100µm previsto en el procedimiento de pintura del proyecto (Figura 2).

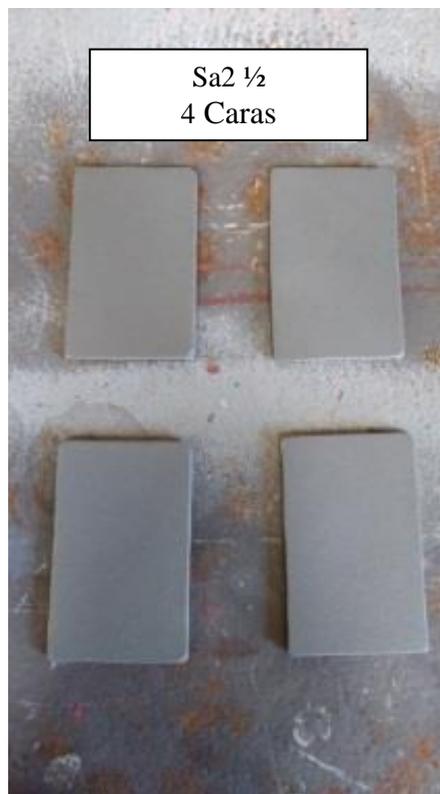


Figura 1. Láminas preparadas con chorro abrasivo Sa2½ (Ribeiro Filho, 2018)



Figura 2. Rugosímetro en lámina patrón St3 (Ribeiro Filho, 2018)

¹ Zona atmosférica – Elementos de la plataforma que se ubica sobre el nivel del mar.

Tabla 1. Esquema de pintura para zona atmosférica

TRATAMIENTO DE SUPERFICIE							
Temperatura de operación	Grado de preparación	Sales solubles en agua			Perfil de rugosidad		
Hasta 80°C	Sa2½	<5µg/cm ²			50µm a 100µm		
APLICACIÓN DE PINTURA							
Mano	Pintura	EPS ² (µm)		Color	Método de aplicación	Intervalo de pintura	
		Mínimo	Máximo			Mínimo	Máximo
1 ^a	N-2680 Epóxi s/ solventes ³	135	180	Rojo	Rodillo/ cepillo de pulverización sin aire	12h	120h
2 ^a	N-2680 Epóxi s/ solventes	135	180	Gris-claro	Rodillo// cepillo de pulverización sin aire	12h	120h
3 ^a	N-2680 Epóxi s/ solventes	135	180	Gris-claro	Rodillo// cepillo de pulverización sin aire	12h	120h
4 ^a	N-2677 Poliuretano ⁴	40	60	Según local	Rodillo// cepillo de pulverización sin aire	-	-

Las superficies fueron sometidas a tratamiento según la norma ISO 8501-1 (ISO, 2007) para los CPs que recibieron la preparación St3; y tratamiento según la norma NBR 15239 (ABNT, 2005) para los que fueron preparados en el patrón Sa2½. A cada mano de pintura, la EPS fue medida de acuerdo con la norma NBR 10443 (ABNT, 2008) y los resultados de la preparación están presentados en la Tabla 2. Las Figuras 3 y 4 ilustran, respectivamente la pintura y la medición de la EPS.

Tabla 2. Preparación de las probetas o cuerpos de prueba

C				NaCl	Salt test	N-2680		N-2680		N-2680		N-2677		EPS promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	B	St3	42µm*	nao	<5µg/cm ²	x	136 µm	-	-	-	-	x	31 µm	167 µm
2	B	Sa2½	72µm	nao	<5µg/cm ²	x	119 µm	-	-	-	-	x	55 µm	174 µm
3	B	St3	N/A	nao	<5µg/cm ²	x	138 µm	x	115 µm	x	229 µm	x	69 µm	551 µm
4	B	Sa2½	68µm	nao	<5µg/cm ²	x	154 µm	x	149 µm	x	203 µm	x	72 µm	578 µm
5	A	Sa2½	65µm	sim	19µg/cm ²	x	110 µm	-	-	-	-	x	60 µm	170 µm
6	D	St3	N/A	nao	<5µg/cm ²	x	210 µm	-	-	-	-	x	73 µm	283 µm

Índice de columnas da Tabla 2

Columna 1 – Grado de corrosión de la lámina antes de la preparación, según patrón fotográfico de la norma ISO 8501-1 (ISO, 2007);

² EPS – Espesor de la película seca.

³ N-2680 – Pintura bicomponente (A – resina epóxi / B – agente de cura: poliamina) – Norma Petrobras para pinturas.

⁴ N-2677 – Pintura Poliuretano Acrílico Alifático (A – resina acrílica / B – agente de cura: poliisocianato alifático) – Norma Petrobras de pinturas.

Columna 2 – Preparación de la superficie según la norma ISO 8501-1 (ISO, 2007) aplicando herramienta mecánica rotativa con disco de lija granulometría 24, según la norma BR 15239 (ABNT, 2005) para St3 y la norma N-9 (PETROBRAS, 2006) para Sa2½;

Columna 3 – Resultado del ensayo de rugosidad según la norma SP-0287 (NACE, 2016);

Columna 4 – Fue realizada contaminación con NaCl antes da pintura?;

Columna 5 – Resultado del *salt test* para superficie contaminada, según la norma ISO 8502-6 (ISO, 2006);

Columna 6 – Aplicada la primera mano de pintura N-2680;

Columna 7 – EPS – Espesor de la película seca de la primera mano de pintura N-2680;

Columna 8 – Aplicada la segunda mano de pintura N-2680;

Columna 9 – EPS – Espesor de la película seca de la segunda mano de pintura N-2680;

Columna 10 – Aplicada la tercera mano de pintura N-2680;

Columna 11 – EPS – Espesor de la película seca de la tercera mano de pintura N-2680;

Columna 12 – Aplicada la pintura de acabado N-2677;

Columna 13 – EPS – Espesor de la película seca de la pintura de acabado;

Columna 14 – EPS total – Espesor total de la película seca.

* Para tratamiento de superficie St3, no es aplicable a la realización del ensayo de rugosidad, sin embargo fue realizada la medición de la rugosidad en el grupo 1 para la verificación de la efectividad del tratamiento.

Notas:

- Grupos 1, 3 y 6 con tratamiento de superficie St3;
- Grupos 2, 4 y 5 con tratamiento de superficie Sa2½;
- Grupos 1, 2 y 6 con baja EPS;
- Grupos 3 y 4 con esquema de pintura completo – EPS mínimo de 445µm (3x135+40)µm y máximo de 600µm (3x180+60)µm.

(PU) poliuretano
Código de color N6.5 (gris)



Figura 3. Pintura de Acabado (Ribeiro Filho, 2018)

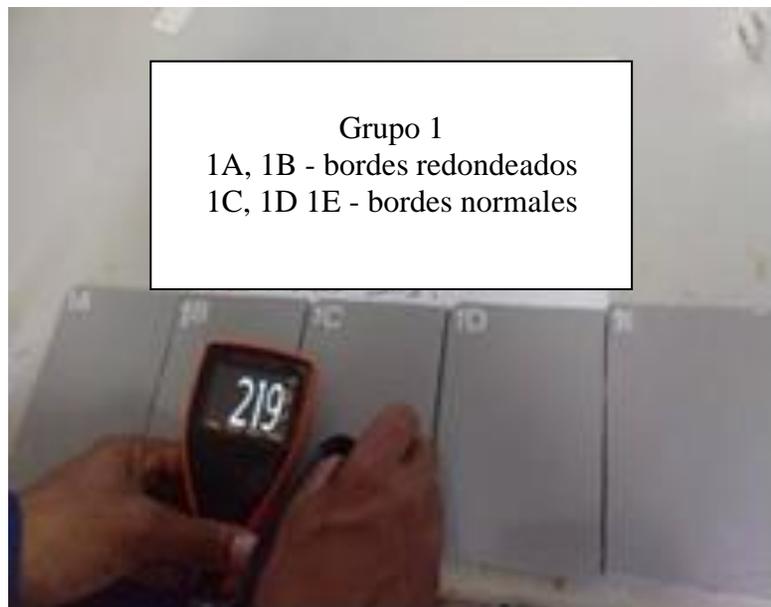


Figura 4. Medición de EPS total (Ribeiro Filho, 2018)

Distinto que los grupos 1, 2, 3 y 4, en que fue utilizada la lámina con grado de corrosión B, en el grupo 5 fue usada la lámina con grado de corrosión A, que fue contaminada con cloruro de sodio luego la preparación con chorro abrasivo patrón Sa2½, siendo posteriormente realizada la pintura

con bajo espesor. Luego la contaminación, la salinidad medida en la superficie de los CPs fue de $19\mu\text{g}/\text{cm}^2$, verificada según las normas ISO 8502-6 (ISO, 2006) (*salt test*) e ISO 8502-9 (ISO, 1998), que es un valor superior al límite máximo para estructuras situadas en la zona atmosférica de la plataforma, que en ese caso no debe exceder a $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

La presencia de cloruro de sodio es determinante al inicio y durante el proceso de corrosión, en la exposición a intemperies. (Sosa et al., 2018).

Para el grupo 6, fueron preparadas apenas dos probetas en láminas de grado de corrosión D para la verificación del comportamiento de la corrosión en una situación específica de bajo espesor en la superficie convexa, que es la pintura sobre puntos de soldadura en la superficie de la lámina.

Luego de la pintura, fueron realizadas muescas para simular daños/defectos experimentales en la película de pintura de los CPs de todos los grupos, siendo parte de ellos longitudinales y partes puntuales, de 5mm de diámetro, como lo ilustrado en la Figura 5.

2.2 Cámara de Niebla Salina (*Salt Spray*)

Todos los CPs fueron sometidos a la cámara de *salt spray* (Figura 6) con niebla salina de 5% de concentración de cloruro de sodio (NaCl), con pulverización uniforme de la niebla y temperatura controlada, siempre mantenida, de acuerdo con las normas ISO 9227 (ISO, 2012), NBR-8094 (ABNT, 1983) y B117-16 (ASTM, 2001), en el intervalo $(35\pm 2)^\circ\text{C}$, donde permanecieron por 1550h.



Figura 5. CPs con daños experimentales a la película (Ribeiro Filho, 2018)



Figura 6. CPs en cámara salina antes da exposición a niebla (Ribeiro Filho, 2018)

2.3 Ensayo de Líquido Penetrante

Luego de retirar de la cámara salina (Figura 7) los CPs fueron lavados con agua corriente limpia a temperatura ambiente $<40^\circ\text{C}$, para la remoción del depósito de sales, e inmediatamente realizado el secado. Seguidamente, fueron sometidos a ensayo de líquido penetrante (LP), según la norma NBR 9583 (ABNT, 1997), con lo cual fueron detectados puntos de mayor incidencia de corrosión (Figuras 8 y 9).

Esos puntos fueron seleccionados y en ellos los CPs fueron seccionados transversalmente (Figura 10) y sus secciones observadas en microscopio/estereoscopio LBM-044, modelo con el cual fue realizada la medición del alcance de la corrosión subpelicular.



Figura 7. CPs con 1550h de exposición (Ribeiro Filho, 2018)



Figura 8. Ensayo de LP aguardando tiempo de revelación (Ribeiro Filho, 2018)



Figura 9. CP aguardando revelación (Ribeiro Filho, 2018)

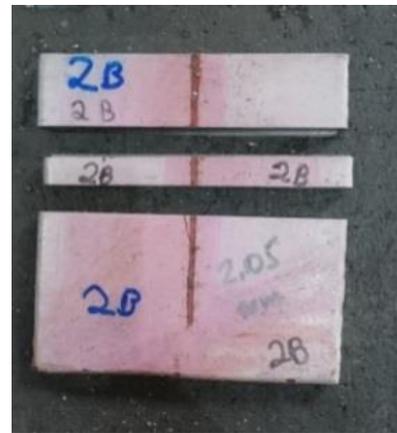


Figura 10. CP seccionado para observación en microscopio (Ribeiro Filho, 2018)

3. RESULTADOS

Fueron realizadas tres mediciones del avance de la corrosión bajo la película en cada sección, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Medición de la corrosión subpelicular en los CPs

Grupo	CP	Grado de corrosión	Tratamiento de superficie	EPS (µm)	Daño a la película de pintura antes do salt spray				Extensión de la corrosión (mm)			
					Daño criado	Ancho del daño (mm)	Ø do daño (mm)	Profundidad do daño	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio
1	1A	B	St3	167	longitudinal	2	-	llegó al sustrato	1,120	0,705	0,890	0,91
	1B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
	1C	B			puntual	-	5	llegó al sustrato	0,963	1,582	2,120	1,56

Grupo	CP	Grado de corrosión	Tratamiento de superficie	EPS (µm)	Daño a la película de pintura antes do salt spray				Extensión de la corrosión (mm)			
					Daño criado	Ancho del daño (mm)	Ø do daño (mm)	Profundidad do daño	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio
	1D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
2	2A	B	Sa2½	174	longitudinal	2	-	llegó al sustrato	0,888	1,060	0,390	0,78
	2B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	1,010	0,34
	2C	B			puntual	-	5	llegó al sustrato	0,550	1,711	1,084	1,12
	2D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
3	3A	B	St3	551	longitudinal	2	-	llegó al sustrato	1,034	1,19	1,175	1,13
	3B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
	3C	B			puntual	-	5	llegó a lámina (sustrato)	1,273	1,041	0,880	1,06
	3D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
4	4A	B	Sa2½	578	longitudinal	2	-	llegó al sustrato	1,038	1,170	0,585	0,93
	4B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
	4C	B			puntual	-	5	llegó al sustrato	0,000	0,930	1,160	0,70
	4D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo	0,000	0,223	0,000	0,07
5	5A	A	Sa2½	170	longitudinal	2	-	llegó o sustrato	1,195	0,950	0,490	0,88
	5B	A			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,780	0,26
	5C	A			puntual	-	5	llegó al sustrato	1,049	1,238	1,120	1,14
	5D	A			puntual	-	5	preservó pintura de fondo	0,000	0,000	0,000	0,00
6	6A	D	St3	283	puntual	-	5	llegó al sustrato	-	-	-	0,81
	6B	D			puntual	-	-	preservó pintura de fondo	-	-	-	0,00

3.1 Análisis de los resultados

Los resultados mostraron que en los casos en que hubo al menos la pintura de fondo con continuidad, no ocurrió corrosión o llegó a niveles muy bajos, inclusive cuando la preparación de superficie fue St3 y la pintura fue realizada con bajo espesor (Tabla 3). Por otro lado, en los casos en que hubo discontinuidad completa de la película alcanzó el sustrato, se observó que la corrosión avanzó bajo la película, de manera casi idéntica, en aproximadamente 1mm en exposición de 1550h, es decir, en el orden de 6.5×10^{-4} mm/h.

En las Tablas 4, 5 y 6, que fueron recortadas de la Tabla 3, se muestra que para los grupos 3 y 4 (sistema completo de pintura), fue obtenido el resultado promedio de 0.96mm y para los grupos 1, 2 y 6⁵ (baja espesor), hubo un promedio de 1.03mm (Tablas 4 y 5). Así como en el caso del grupo 5, en el cual la película poseía bajo espesor y la superficie fue contaminada con NaCl, se obtuvo un resultado cercano con 1.01mm (Tabla 6), que puede ser atribuido a la baja penetración de la corrosión bajo la película, a pesar de la contaminación y también por haber sido utilizada la lámina con grado de Corrosión A. Ese grupo específicamente fue el único en que fue verificado el surgimiento de ampollas (*blistering*)⁶, con burbujas dispersas en la superficie de la lámina, probablemente debido a la ósmosis, causada por la pintura sobre contaminación salina.

Tabla 4. Corrosión en CP – Película con bajo espesor

Grupo	CP	Grado de corrosión	Tratamiento de superficie	EPS (µm)	Daño a película de pintura antes del salt spray				Extensión de corrosión (mm)				Promedio da extensión da corrosión (mm) para CPs com corrosión baja EPS
					daño criado	Ancho del daño (mm)	Ø do daño (mm)	Profundidad do daño	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	
1	1A	B	St3	167	longitudinal	2	-	llegó o substrato	1,120	0,705	0,890	0,91	1,03
	1B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo intacta	0,000	0,000	0,000	0,00	
	1C	B			puntual	-	5	llegó o substrato	0,963	1,582	2,120	1,56	
	1D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo intacta	0,000	0,000	0,000	0,00	
2	2A	B	Sa2½	174	longitudinal	2	-	llegó o substrato	0,888	1,060	0,390	0,779	
	2B	B			longitudinal	2	-	preservó pintura de fondo intacta	0,000	0,000	1,010	0,337	
	2C	B			puntual	-	5	llegó o substrato	0,550	1,711	1,084	1,115	
	2D	B			puntual	-	5	preservó pintura de fondo intacta	0,000	0,000	0,000	0,000	
6	6A	B	St3	283	puntual	-	5	llegó o substrato	-	-	-	0,81	

⁵ El grupo 6 fue considerado junto con los sistemas de bajo espesor debido a su proximidad con el mínimo deseable para ambientes altamente agresivos (250µm).

⁶ Ampollamiento – Patología de pintura conocida como *blistering*, o burbujas, que presenta protuberancias semiesféricas en la película, que varían de tamaño e intensidad. Puede haber presencia de líquido o no en el interior de las burbujas.

Tabla 5. Corrosión en CP con sistema completo – Película con alto espesor

Grupo	CP	Grado de corrosión	Tratamiento de superficie	EPS (µm)	Daño a película de pintura antes do salt spray				Extensión de corrosión (mm)				Promedio da extensión da corrosión (mm) para CPs com alta EPS
					daño criado	Ancho del daño (mm)	Ø do daño (mm)	Profundidad do daño	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	
3	3A	B	St3	551	longitudinal	2	-	llegó o substrato	1,034	1,190	1,175	1,13	0,96
	3C	B			puntual	-	5	llegó o substrato	1,273	1,041	0,880	1,06	
4	4A	B	Sa2½	578	longitudinal	2	-	llegó o substrato	1,038	1,170	0,585	0,93	
	4C	B			puntual	-	5	llegó o substrato	0,000	0,930	1,160	0,70	

Tabla 6. Corrosión en CP con sistema incompleto y contaminación de NaCl

Grupo	CP	Grado de corrosión	Tratamiento de superficie	EPS (µm)	Daño a película de pintura antes do salt spray				Extensión de corrosión (mm)				Promedio (mm) para CPs com baja espesor e contaminación NaCl
					daño criado	Ancho del daño (mm)	Ø do daño (mm)	Profundidad do daño	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	
5	5A	A	Sa2½	170	longitudinal	2	-	llegó o substrato	1,195	0,950	0,490	0,88	1,01
	5B	A			longitudinal	2	-	preservó a pintura de fondo intacta	0,000	0,000	0,780	0,26	
	5C	A			puntual	-	5	llegó o substrato	1,049	1,238	1,120	1,14	

Como ejemplos, las observaciones en el microscopio ilustradas en las Figuras 11 y 12 mostraron que, en los casos en que ocurrió ruptura de la película hasta el substrato, hubo corrosión tanto en el esquema completo de pintura (CP4A) como en el esquema de bajo espesor (CP2A), ambos con preparación de superficie Sa2½, que ofrece mayor adherencia.

En contrapartida, el CP1B mostrado en la Figura 13, que fue preparado con bajo espesor de película y tuvo previamente rota la pintura de acabado, pero mantuvo preservada la pintura de fondo, finalizadas las 1550h presentó corrosión. Para casos similares, hubo excepción apenas en los CPs 2B, 4D y 5B, en que ocurrió corrosión reducida y en apenas una de las tres mediciones mostradas en la Tabla 3. Se concluyó que, cuando es bien ejecutada la preparación de superficie (patrón St3 ou Sa2½), si la película presenta bajas tasas de permeabilidad y de porosidad, y baja exposición de picos, como fue la preparación de los CPs de ese ensayo, el acceso del electrolito al substrato tiende a concentrarse en la discontinuidad de la película y su velocidad de corrosión es semejante para todos los casos presentados, inclusive con la significativa diferencia en el espesor de la película para el tiempo de exposición considerado (1550h).

En la Figura 14 se puede observar la imagen del CP 6A, en el cual la pintura sobre un punto de

soldadura presentó una variación representativa del espesor de la película. Pero debido a su integridad, fue preservada la protección anticorrosiva del sistema, inclusive con el espesor de $283\mu\text{m}$ en la película.

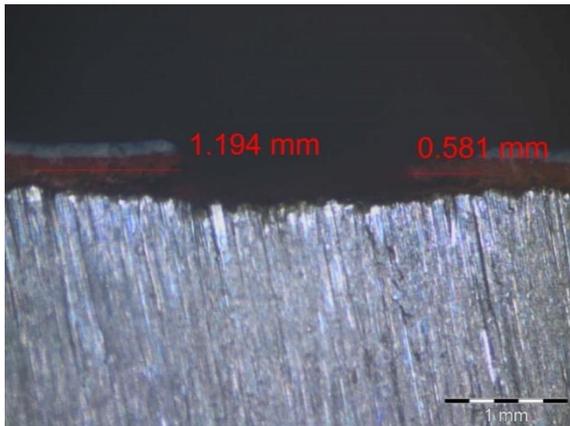


Figura 11. Medición de corrosión bajo la película del CP 2A (Ribeiro Filho, 2018)

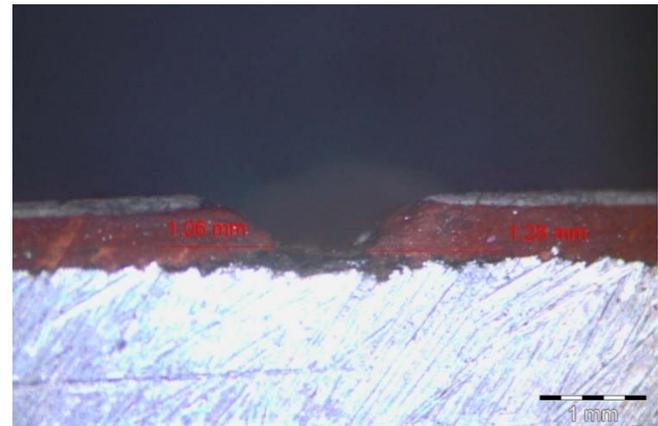


Figura 12. Medición de corrosión bajo la película de CP 4A (Ribeiro Filho 2018)

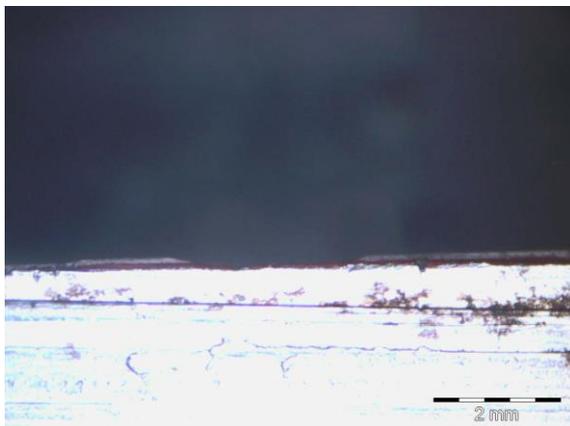


Figura 13. Medición de corrosión bajo película del CP 1B (Ribeiro Filho, 2018)

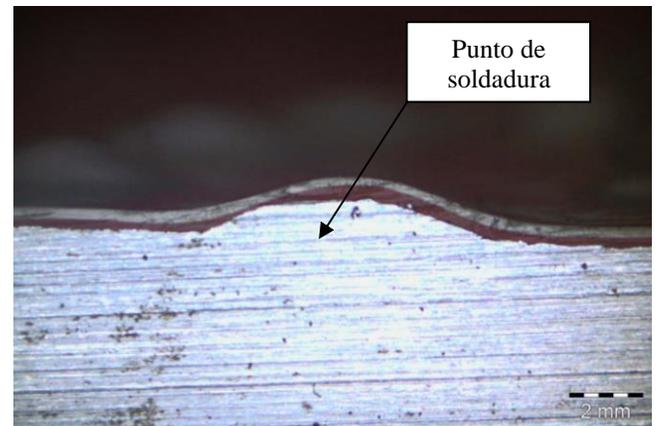


Figura 14. Sección transversal CP 6A (Ribeiro Filho, 2018)

3.2 Análisis de ejemplo obtenido en levantamiento de campo

Para confrontar los resultados obtenidos en laboratorio con la situación real de la plataforma, fue identificada, durante la visita de campo, una superficie con pintura intacta, excepto por un daño mecánico aislado en toda la película. Al remover radialmente la película de pintura a partir de ese punto central, los límites de la corrosión encontrados mostraron configuración circunferencial, denotando corrosión igual en todos los sentidos, lo que puede ser verificado por la existencia de acero arenado sin corrosión presentando patrón Sa2½ a partir de los límites del borde de la corrosión, que llegó a un radio de 21mm (Figuras 15 y 16).



Figura 15. Daño mecánico en pintura de campo (Ribeiro Filho, 2018)



Figura 16. Zona limítrofe del área corroída sin corrosión (Ribeiro Filho, 2018)

Tomando en cuenta que, no se tiene conocimiento de la fecha exacta del daño, ni del inicio de la exposición, que era la peor de las hipótesis es que el daño haya ocurrido en el día de la paralización de la plataforma, lo que representa un período aproximado de tres años (3×8760 h), ocurrió una velocidad de corrosión promedio de 8×10^{-4} mm/h, que es un valor considerado cercano al valor encontrado en laboratorio, de 6.5×10^{-4} mm/h.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que cuando el sustrato es alcanzado, el rompimiento de la película de pintura tiene gran impacto en la corrosión subpelicular.

Grupos de probetas que fueron preparados con bajo espesor, o que tuvieron la película rota preservando la primera mano, mantuvieron buena parte de la protección anticorrosiva, con resultados cercanos a los de un ejemplar obtenido en el levantamiento de campo en la plataforma. Fue verificada con excepción apenas para el grupo en el que se introdujo la contaminación salina del sustrato, que en ese caso presentó corrosión favorecida por ósmosis, en la forma de *blistering*. La realización del sistema completo sin manifestaciones patológicas, así como la calidad e integridad de la película pueden asegurar una adecuada protección anticorrosiva. No obstante, el análisis de los resultados demuestra que la integridad de la película tuvo influencia decisiva en la protección anticorrosiva y, para el tiempo de exposición determinado, si se consideran las películas sin otras manifestaciones patológicas (porosidad, ataque por el medio corrosivo etc.), tuvo también mayor importancia que las variaciones de EPS. Se comprobó que en las situaciones en que hubo continuidad de al menos la primera mano de la película de pintura, el sustrato quedó protegido contra corrosión cuando es expuesto a la cámara salina por 1550h; inclusive en los grupos de bajo espesor ($< 250 \mu\text{m}$). Cuando el daño llegó al sustrato, el avance de la corrosión subpelicular se mostró con velocidad semejante en todos los casos.

5. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen a CAPES, a Universidade Federal de Ouro Preto, a Techint Ingeniería e Construcción S/A e ao Instituto Federal de Educação, Ciencia e Tecnologia, MG, *campus* Congonhas.

6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1983). *NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à névoa salina*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 9583. Implantes para cirurgia - Ensaio não-destrutivo - Inspeção por líquido penetrante de implantes cirúrgico metálicos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15239: Tratamento de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). *NBR 10443: Tintas e vernizes – Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2001). *B117-16: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*. West Conshohocken, PA.
- Chawla S. L, Gupta K. K. (1995), “*Materials selection for corrosion control*”, Materials Park, OH, ASM International.
- Gentil, V. (2007), “*Corrosão*”, 5. ed., LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- ISO (1998). *ISO 8502-9: Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Tests for the assessment of surface cleanliness – Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts*. Geneva, Switzerland.
- ISO (2006). *ISO 8502-6: Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Tests for the assessment of surface cleanliness – Part 6: Extraction of soluble contaminants for analysis – The Bresle method*. Geneva, Switzerland. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/9727591>
- ISO (2007). *ISO 8501-1: Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings*. Geneva, Switzerland. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/9871577>
- ISO (2012). *ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests*. 3rd ed. Geneva, Switzerland.
- Jones, D. A. (1996), “*Principles and prevention of corrosion*”, 2nd ed., Prentice-Hall Inc, New York, University of Nevada, Nevada.
- Nunes, L. D. P., Lobo, A. C. O. (2007), “*Pintura industrial na proteção anticorrosiva*”, 3. ed., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Ramanathan, L. V. (1988), “*Corrosão e seu controle*”, Editora Hemus, Rio de Janeiro.
- Ribeiro Filho, G. L. (2018), “*Estudo de patologias de pintura e corrosão atmosférica em plataforma de petróleo*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Silva, P. F. D. (1981), “*Introdução à corrosão e proteção de superfícies metálicas*”, Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte.
- Sosa, M. R., Pérez, T., Moo-Yam, V. M. J., Chávez, E. and Pérez-Quiroz, J. T. (2018), “*Análise da interface concreto-aço em corpos de prova expostos à intempérie e imersos em água do mar natural*”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 16 – 29, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>
- Wolynec S. (2003), “*Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*”, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme

E. F. Felix^{1*} , R. Carrazedo¹ , E. Possan² , E. S. Ramos¹ 

*Autor de Contacto: emerson.felipe.felix@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.395>

Recepción: 21/02/2019 | Aceptación: 11/12/2019 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Este trabajo presenta la modelización y análisis de los efectos de la corrosión por carbonatación en elementos de concreto reforzado a través de un modelo numérico basado en el Método de los Elementos Finitos. Para controlar y minimizar el daño asociado a la corrosión se hace necesario disponer de herramientas y conocimientos suficientes para comprender los efectos de esta manifestación patológica sobre el comportamiento mecánico del concreto reforzado. Ante los resultados obtenidos, se constató que, dependiendo del nivel de corrosión de las armaduras, el elemento de concreto tiene su estado de tensión y deformación alterado. Además, los resultados indican la eficiencia del modelo desarrollado y su aplicabilidad frente a la simulación del comportamiento mecánico del concreto reforzado con corrosión uniforme.

Palabras clave: concreto reforzado; corrosión; modelización numérica; método de los elementos finitos.

Citar como: Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E., Ramos, E. S. (2020), "Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme", Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 300 – 316, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.395>

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

² Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Brasil.

Editor asociado responsable de este artículo: Andrés Antonio Torres Acosta

Contribución de cada autor

En este trabajo, E. F. Félix contribuyó con las actividades de conceptualización, desarrollo de software, modelado, resultados y discusión, redacción y preparación del texto original; R. Carrazedo contribuyó con la adquisición de financiamiento, conceptualización, supervisión, discusión de los resultados, redacción-revisión; E. Possan contribuyó a la supervisión, redacción y revisión; y E. S. Ramos contribuyó a las actividades de modelado y discusión de los resultados.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Development and analysis of a numerical model of the reinforced concrete expansion by uniform corrosion

ABSTRACT

This paper presents the modeling and analysis of the corrosion effects due to carbonation on reinforced concrete elements through a numerical model based on the Finite Element Method. In order to minimize corrosion damage, tools are required to understand the pathological manifestation on the mechanical behavior of reinforced concrete. It was found that depending on the reinforcement corrosion stage, the state of stress and deformation of the concrete element is compromised. Besides, results show the efficiency of the developed model and its applicability to the simulation of the mechanical behavior of reinforced concrete structures subjected to uniform corrosion.

Keywords: Reinforced concrete; corrosion; numerical modeling; Finite Element Method.

Desenvolvimento e análise de um modelo numérico de expansão de concreto armado sujeito à corrosão uniforme

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem e análise dos efeitos da corrosão por carbonatação em elementos de concreto armado através de um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos. Para controlar e minimizar os danos associados à corrosão faz-se necessário determinar ferramentas e conhecimento suficientes para entender os efeitos desta manifestação patológica sobre o comportamento mecânico do concreto armado. Diante dos resultados obtidos, constatou-se que a depender do nível de corrosão das armaduras, o elemento de concreto tem seu estado de tensão e deformação comprometido. Ademais, os resultados apontam a eficiência do modelo desenvolvido e a sua aplicabilidade frente à simulação do comportamento mecânico de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão uniforme.

Palavras-chave: Concreto armado; corrosão; modelagem numérica; Método dos Elementos Finitos.

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.

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

Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de estructuras de concreto reforzado debido a la acción de la corrosión de las armaduras es de difícil medición por la complejidad del fenómeno físico-químico y de los múltiples parámetros ahí involucrados (Mehta y Monteiro, 2014). Del punto de vista de la mecánica de materiales y de las estructuras, el principal efecto de la corrosión para las armaduras consiste en la pérdida de masa del acero y, por consecuencia, en la transformación de este material en los productos de corrosión, o herrumbre, como se les conocen comúnmente. Los productos de la corrosión poseen naturaleza expansiva, generando tensiones en el interior del concreto que llevan a su fisuración y desprendimiento a lo largo del tiempo.

En general, el concreto presenta condiciones suficientes para la protección de las armaduras contra la corrosión, gracias a la alta alcalinidad de la pasta (pH entre 12 y 13). Sin embargo, esa protección se pierde a medida que el concreto es sujeto a diferentes agentes agresivos presentes en la atmósfera, por ejemplo, iones cloruro (Cl^-) y dióxido de carbono (CO_2) (Gentil, 2011).

Dependiendo de la concentración del agente agresivo presente en la atmósfera, el proceso corrosivo puede ser clasificado como uniforme o localizado. La corrosión localizada o por picadura ocurre cuando iones cloruro causan un aumento de la conductividad eléctrica del concreto y atacan la capa pasiva que protege las armaduras. En este tipo de corrosión solo algunas regiones de la armadura pierden masa de acero, justificando el término “localizada”, usado para su clasificación (Ribeiro et al., 2015).

El proceso corrosivo es dicho uniforme o por carbonatación cuando el contenido de CO_2 presente en la atmósfera es preponderante al de iones cloruro. En este caso, la difusión de CO_2 en el concreto resulta en la disminución del pH de la matriz cementicia (de aproximadamente 13 o 12 hasta 9), lo que lleva a destrucción de la capa pasiva que recubre las armaduras, tornando el acero susceptible a la corrosión (Mehta e Monteiro, 2014).

La corrosión uniforme ocurre predominantemente en estructuras con concreto de baja calidad, en lugares donde el recubrimiento de la armadura es insuficiente para garantizar la protección del acero o en ambientes de severa agresividad (Ribeiro et al., 2015). Helene (1986) ha verificado que, en esos casos, la corrosión lleva a la formación de productos de corrosión en la interfaz entre el acero y el concreto, y que esos pueden ocupar un espacio 3 a 10 veces mayor a lo inicial.

De acuerdo a Andrade et al. (1993) y Ribeiro et al. (2015), la formación y desarrollo de los productos de corrosión debido a la corrosión uniforme dependen de diversos factores, sean estos ambientales (temperatura del ambiente, humedad relativa del aire, grado de agresividad del ambiente, exposición al CO_2 , entre otros) o constructivos (tipo de cemento usado en la producción del concreto, relación agua/cemento del concreto, tipo de acero, dimensiones del recubrimiento de las armaduras, entre otros). Con la formación de los productos de corrosión, campos internos de tensión son generados en la interfaz del acero con el concreto. A medida que las tensiones generadas por los productos de corrosión se vuelven superiores a las resistidas por el concreto, microfisuras se manifiestan en la matriz del concreto que, con la progresión de las manifestaciones patológicas, aumentan de tamaño y espesor, propagándose por todo el elemento estructural hasta causar el desprendimiento del concreto de recubrimiento, afectando la durabilidad y reduciendo la vida útil de la estructura. El proceso de degradación se muestra en la Figura 1.

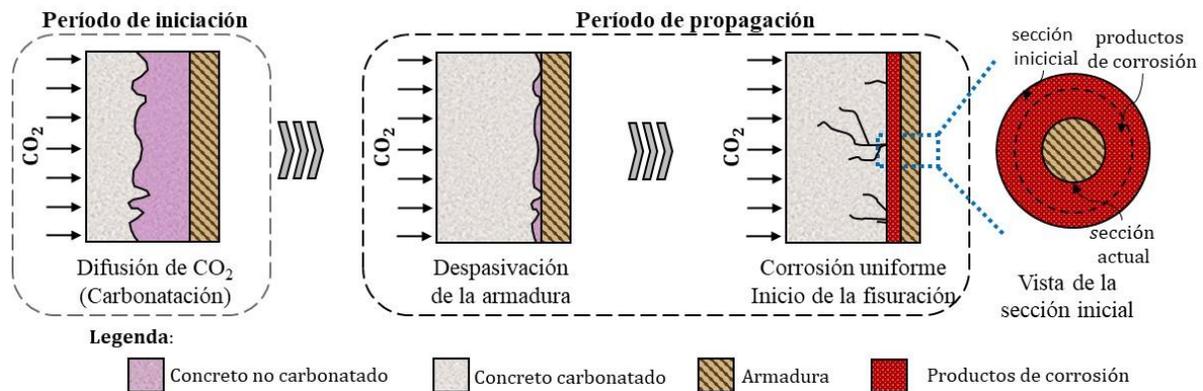


Figura 1. Evolución de la corrosión en el concreto.

A fin de minimizar los efectos de la corrosión es necesario conocer las formas de iniciación y propagación del proceso corrosivo, lo que posibilita la reducción de su incidencia y, en casos avanzados, la reparación y/o restauración de las estructuras a manera de aumentar su vida útil y reducir riesgos y daños a sus usuarios.

Para el estudio de la corrosión y de sus efectos en el comportamiento mecánico del concreto reforzado, se llevaron a cabo algunos trabajos experimentales (Molina et al., 1993; Almusallam, 2001; Graeff, 2007; Zhu, 2014), los cuales resultaran en descubrimientos relevantes para el área. Sin embargo, tres importantes limitaciones son apuntadas por los investigadores: (i) la dificultad de estudiar aisladamente los diferentes factores que influyen en el proceso de corrosión; (ii) elevados costos y (iii) tiempo necesario para la realización de los experimentos.

Con el avance de la computación, diversas herramientas numéricas fueron desarrolladas, por ejemplo, el método de los elementos de contorno (MEC), el método de los elementos finitos (MEF), redes neurales artificiales (RNA), entre otras, haciendo que los investigadores del área las usen para la creación de modelos numéricos, una vez que esas herramientas se presentan como una alternativa eficiente para la superación de los límites anteriormente mencionados.

Teniendo eso en cuenta, Hansen y Saouma (1999), Maruya et al. (2003) y Bhargava et al. (2005) usaron diferentes herramientas numéricas para la resolución de forma automatizada de ecuaciones matemáticas referentes a los mecanismos de corrosión, lo que posibilitó el análisis de los efectos de corrosión y su propagación. Procedimientos semejantes fueron adoptados por Isgor y Razaqpur (2006), Xu et al. (2009), Du y Jin (2014), Ožbolt et al. (2014) y Paul y Zijl (2016), pero los autores solucionaron el problema químico-mecánico, relativo a la corrosión en elementos de concreto reforzado, vía método de los elementos finitos.

De esta manera, se dio continuidad al uso de herramientas numéricas para el estudio de la corrosión y sus efectos y en el presente trabajo un modelo numérico desarrollado vía método de los elementos finitos posicional (MEFP) es presentado y analizado. El modelo desarrollado posibilita la simulación de la expansión del concreto reforzado debido a la corrosión uniforme y, en especial, a la formación de los productos de corrosión.

2. MODELO DE EXPANSIÓN DEL CONCRETO DEBIDO A LA CORROSIÓN

2.1 Modelo mecánico

Con el objetivo de simular la expansión del concreto reforzado debido a la corrosión uniforme, en especial a la formación de los productos de corrosión, se desarrolló una herramienta numérica basada en el método de los elementos finitos posicional (MEFP). El código se llevó a cabo en lenguaje Fortran y considera diferentes formulaciones analíticas para la determinación de parámetros representativos de corrosión.

Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme

Para la determinación del comportamiento mecánico del concreto reforzado, se empleó una formulación basada en el MEFP para sólidos compuestos, desarrollada en Vanalli et al. (2008) y Paccola y Coda (2016), donde los parámetros nodales que se consideran son las posiciones y las deformaciones que se miden con relación a la posición inicial del cuerpo. La medida de deformación es la de Green y la ley constitutiva de los materiales es de Saint-Venant-Kirchhoff.

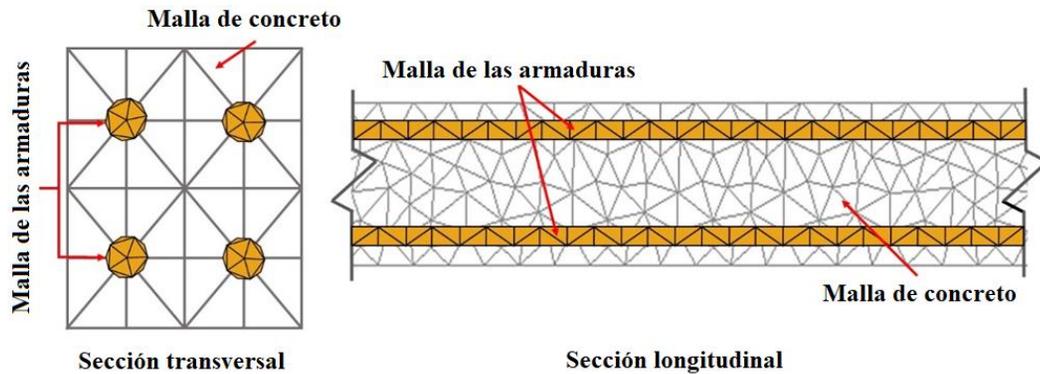


Figura 2. Discretización de la sección transversal y longitudinal de una viga de concreto.

El concreto reforzado es discretizado teniendo en cuenta la matriz de concreto y armaduras (Figura 2). Tanto la matriz de concreto como las armaduras son representadas por medio de elementos finitos bidimensionales triangulares planos, siendo la malla de armaduras acoplada a de la matriz de concreto por medio de la técnica de la embutición, descrita en Vanalli et al. (2008) y Paccola y Coda (2016). En este caso ocurre una adherencia perfecta entre la partícula y la matriz, haciendo que el uso de elementos de partículas no aumente los grados de libertad del sistema. Todos los grados de libertad de los elementos de partículas son escritos en función de los elementos de la matriz.

En la secuencia se presenta de manera sucinta el proceso empleado en este trabajo para obtención de la respuesta mecánica de un problema vía MEFP para el concreto reforzado.

Considerando fuerzas conservativas y el principio de la mínima energía potencial estacionaria para la solución del problema no lineal geométrico, la energía potencial total de un sólido compuesto particulado es descrita en (1).

$$\Pi = \int_{V_0^m} \mathbf{u}_e(\mathbf{E}) dV_0^m + \int_{V_0^p} \Theta(\mathbf{E}_p) dV_0^p - \mathbf{F} \cdot \mathbf{Y} \quad (1)$$

en la que Θ es la energía específica de deformación de las partículas, \mathbf{u}_e es la energía específica de deformación de la matriz, \mathbf{F} es el vector de fuerzas conservativas externas, \mathbf{Y} es el vector de posición nodal, \mathbf{E}_p es la deformación desarrollada en las partículas, calculada conforme sigue en (2), \mathbf{E} es la deformación desarrollada en la matriz, también calculada conforme (2), y V_0^p y V_0^m representan los volúmenes iniciales de las partículas y de la matriz, respectivamente.

$$\mathbf{E}_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{C}_{ij} - \delta_{ij}) \quad (2)$$

en la que \mathbf{E}_{ij} representa la parte elástica de deformación, \mathbf{C}_{ij} es el tensor de estiramiento a la derecha de Cauchy-Green y δ_{ij} representa la delta de Kronecker.

Considerando que la variación de energía potencial total es igual a cero en la configuración de equilibrio, el problema consiste en encontrar el vector de posición nodal que remite a esa posición, conforme se presenta en (3).

$$\delta\Pi = \left(\int_{V_0^m} \mathbf{S} : \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Y}} dV_0^m + \int_{V_0^p} \mathbf{S}_p : \frac{\partial \mathbf{E}_p}{\partial \mathbf{Y}} dV_0^p - \mathbf{F} \right) \cdot \delta \mathbf{Y} \quad (3)$$

en la que \mathbf{S} es el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff desarrollado en la matriz elástica y \mathbf{S}_p es el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff desarrollado en las partículas.

La solución de (3) se logra por medio del proceso iterativo de Newton-Raphson, lo cual utiliza como estrategia de solución un vector de desequilibrio de fuerzas \mathbf{g} , conforme sigue en (4).

$$\mathbf{g}(\mathbf{Y}) = \left(\int_{V_0^m} \mathbf{S} : \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Y}} dV_0^m + \int_{V_0^p} \mathbf{S}_p : \frac{\partial \mathbf{E}_p}{\partial \mathbf{Y}} dV_0^p \right) - \mathbf{F} = (\mathbf{F}_{int}^m + \mathbf{F}_{int}^p) - \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (4)$$

en la que \mathbf{F}_{int}^m es el vector de fuerzas internas de la matriz y \mathbf{F}_{int}^p es el vector de fuerzas internas de las partículas. La ecuación (4) involucra un proceso no lineal por lo que es expandida por serie de Taylor, conforme se detalla en (5).

$$\mathbf{g}(\mathbf{Y}) \cong \mathbf{g}(\mathbf{Y}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{Y}} \right|_{\mathbf{Y}_0} \cdot \Delta \mathbf{Y} = \mathbf{g}(\mathbf{Y}_0) + \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{Y} = \mathbf{0} \quad (5)$$

en la que \mathbf{Y} es una posición tentativa y \mathbf{H} es la matriz Hessiana (o matriz de rigidez tangente).

Las fuerzas son conservativas, \mathbf{H} puede ser descompuesta en dos matrices, una referente a contribución de rigidez de los elementos de la matriz (\mathbf{H}_m) y otra de los elementos de partículas (\mathbf{H}_p), como se describe en (6).

$$\mathbf{H} = \left\{ \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Y}} : \frac{\partial^2 \mathbf{u}_e}{\partial \mathbf{E} \partial \mathbf{E}} : \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Y}} + \mathbf{S} : \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Y} \partial \mathbf{Y}} \right) + \left(\frac{\partial \mathbf{E}_p}{\partial \mathbf{Y}} : \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \mathbf{E}_p \partial \mathbf{E}_p} : \frac{\partial \mathbf{E}_p}{\partial \mathbf{Y}} + \mathbf{S}_p : \frac{\partial^2 \mathbf{E}_p}{\partial \mathbf{Y} \partial \mathbf{Y}} \right) \right\} \\ = \mathbf{H}_m + \mathbf{H}_f \quad (6)$$

La solución del sistema no lineal presentada en (5) por el método de Newton-Raphson fornece la corrección de la posición ($\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_0 + \Delta \mathbf{Y}$) y el procedimiento es repetido hasta que $|\Delta \mathbf{Y}|/|\mathbf{X}|$ sea menor a una determinada tolerancia, siendo \mathbf{X} el vector de las posiciones nodales de configuración inicial.

Mayores detalles acerca de las deducciones de las ecuaciones aquí descritas y del proceso de acoplamiento de los elementos de partícula a la matriz pueden ser vistos en Paccola y Coda (2016) y Coda (2018).

2.2 Modelo de corrosión

Comprender como se desarrollan y se distribuyen los productos de corrosión alrededor de la sección de la armadura posibilita la determinación de modelos y herramientas que son capaces de describir los campos de deformación y de tensión que surgen en las estructuras de concreto reforzado sujetas a la corrosión. Estos modelos ayudan en los estudios referentes a los efectos de la corrosión involucrados con el comportamiento mecánico del concreto, la durabilidad y la vida útil de las armaduras.

A lo largo de los últimos años, algunos modelos fueron propuestos con objetivo de representar y describir el perfil de distribución de los productos de corrosión en el entorno de las armaduras, como ejemplo Liu y Weyers (1998), Yuan y Ji (2009), Balafas y Burgoyne (2010) y Kiani y Shodja (2011). En cuanto al perfil de formación y distribución de los productos de corrosión, ellos están divididos en lineal y no lineal, conforme se presenta en la Figura 3.

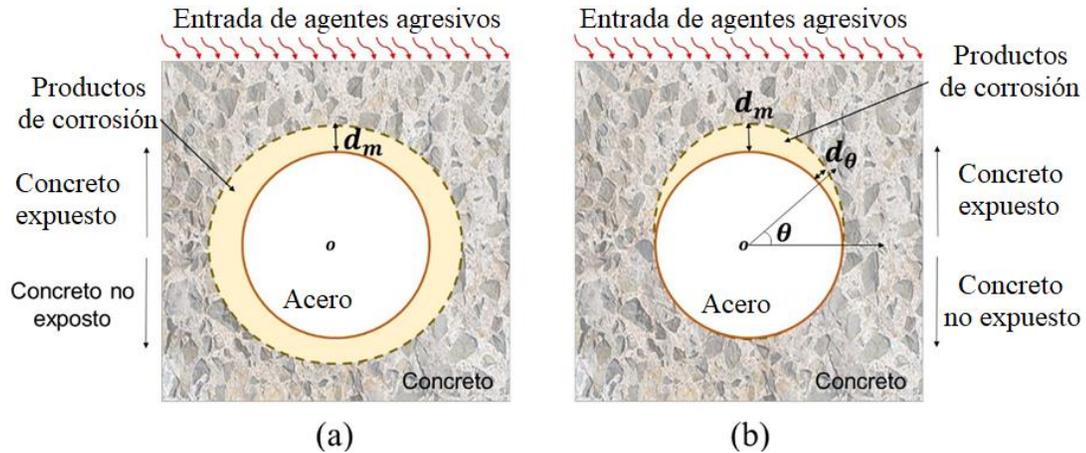


Figura 3. Perfil de formación de los productos de corrosión: (a) lineal y (b) no lineal.

Por tanto, considerando que la corrosión desencadenada por la carbonatación del concreto de recubrimiento se desarrolla en toda la armadura, se aplica el modelo de Kiani y Shodja (2011) en este trabajo para la representación del avance de los productos de corrosión.

Kiani y Shodja (2011) desarrollaron un modelo lineal para la formación de los productos de corrosión en estructuras de concreto reforzado, usando datos experimentales referentes a probetas cilíndricas de concreto conteniendo en su centro una armadura de diámetro y propiedades físicas conocidas (ver Figura 4).

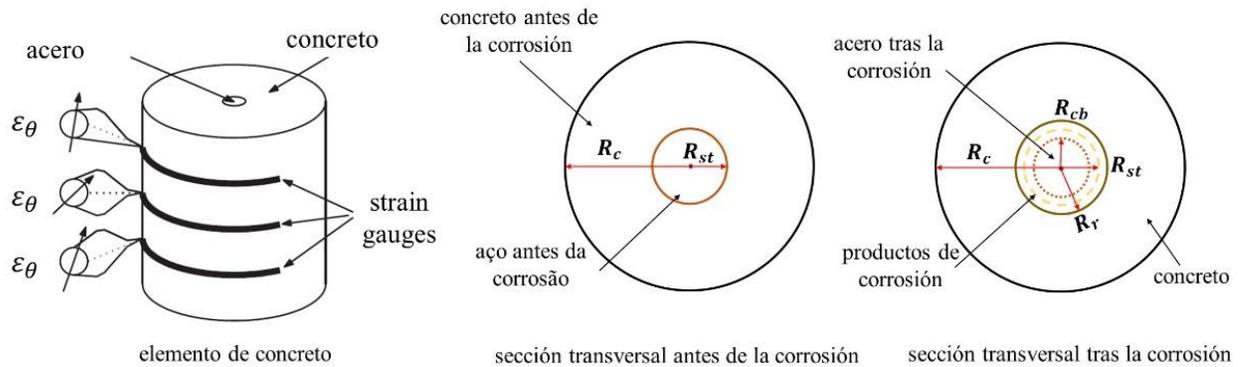


Figura 4. Representación del modelo de Kiani y Shodja (2011).

El modelo de Kiani y Shodja (2011) se resume en la determinación del radio residual de acero (R_{cb}) y del radio de frente de avance de los productos de corrosión (R_r), que pueden ser obtenidos respectivamente en (7) y (8). Para la determinación de estos parámetros es necesario calcular el volumen generado por los productos de corrosión, conforme (9), y el volumen de acero perdido por las armaduras, cuya formulación es descrita en (10).

$$R_{cb} = \sqrt{R_{st}^2 - \frac{V_s}{\pi}} \quad (7)$$

$$R_r = \sqrt{R_{cb}^2 + \frac{V_r}{\pi}} \quad (8)$$

$$V_r(t) = \frac{\alpha}{\rho_{st}} \sqrt{\int_0^t 2 \times 6,78 \times 10^{-10} \pi \cdot R_{st} \cdot i_{corr} dt} \quad (9)$$

$$V_s(t) = \frac{r_m}{\rho_{st}} \sqrt{\int_0^t 2 \times 6,78 \times 10^{-10} \pi \cdot R_{st} \cdot i_{corr} dt} \quad (10)$$

en la que R_{st} se refiere al radio inicial de la armadura (en m), α es la razón entre la densidad del acero y de los productos de corrosión, ρ_{st} es la densidad del acero (en kg/m³), r_m es la proporción de masa de hierro y masa molecular de los productos de corrosión, t (en s) se refiere al tiempo de análisis, siendo dado a partir del momento en que ocurre la despasivación de la armadura e i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión natural (en A/m²), calculada de acuerdo a (11).

$$i_{corr}(t_p) = 0,85 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{37,8 \cdot (1 - a/c)^{-1,64}}{cob} \right] \cdot t_p^{-0,29} \quad (11)$$

En la que a/c es la relación agua/cemento del concreto, t_p es el tiempo de progresión de la corrosión, período contado después de la despasivación de la armadura (en años), y cob es el espesor del concreto de recubrimiento (en cm).

Cabe mencionar que, al considerar corrosión acelerada, la densidad de corriente es inducida de manera constante y, controlada en laboratorio, siendo impuesta de acuerdo con el tiempo en que el elemento de concreto será analizado y no por (11).

2.3 Acoplamiento de los modelos

Al considerar que la sección transversal de un elemento estructural armado sea representada por un elemento compuesto particulado, conforme se muestra en la Figura 5, la expansión del concreto de recubrimiento debido a la formación de los productos de corrosión es simulada por medio de la expansión de la partícula, una vez que la armadura está perfectamente adherida a la matriz de concreto (condición consecuente de la técnica de embutición adoptada en el acoplamiento).

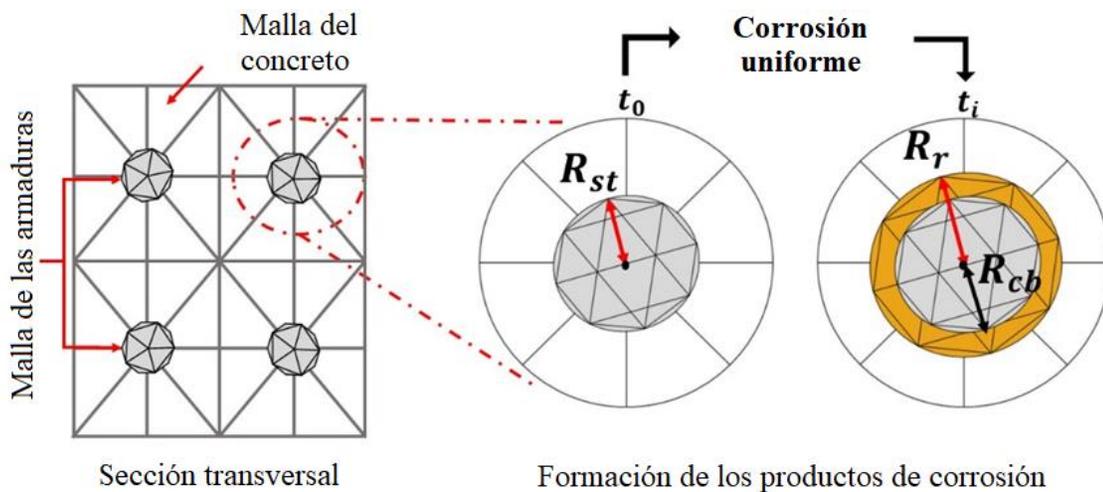


Figura 5. Representación de la corrosión uniforme vía MEF.

Para que la expansión de la armadura corresponda coherentemente a la expansión causada por los productos de corrosión (ϵ_r), la deformación del elemento de partícula es determinada por (12), de acuerdo con la medida de deformación de Green.

Desarrollo y análisis de un modelo numérico de expansión de concreto reforzado sujeto a corrosión uniforme

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \frac{(R_r^2 - R_{st}^2)}{R_{st}^2} \quad (12)$$

Sin embargo, se observa en la Figura 5 y en (12) que después de iniciado el proceso de corrosión, la dimensión de la partícula que representa la armadura pasa a ser equivalente a la dimensión de la sección de acero en su totalidad más la capa de productos de corrosión, que se forma entre el acero y el concreto. Por lo tanto, es necesario corregir el módulo de elasticidad del elemento de partícula, de forma que sean considerados los efectos de la corrosión en relación con la pérdida de sección de acero en su totalidad. Para eso, se le considera que el valor del módulo de elasticidad de la partícula es ponderado en función de la pérdida de sección de acero, conforme se describe en (13).

$$E_p(t) = E_p(0) \frac{R_{cb}}{R_{st}} + E_r \frac{(R_r - R_{cb})}{R_{st}} \quad (13)$$

en la que $E_p(0)$ es el módulo de elasticidad inicial de la partícula (referente a la armadura en su totalidad), $E_p(t)$ es el módulo de elasticidad de la partícula en el instante de análisis, E_r es el módulo de elasticidad del producto de corrosión, R_{st} se refiere al radio inicial de la armadura, R_{cb} es el radio de acero en su totalidad y R_r es el radio referente al frente de los productos de corrosión. Para que se le considere una expansión de concreto debido a la formación de los productos de corrosión, se emplea una descomposición aditiva del tensor de deformaciones de Green. Los términos del tensor de deformación de los elementos de partículas son calculados de acuerdo con (14). Se resalta que la descomposición del tensor solo es posible debido a consideración de pequeñas o moderadas deformaciones.

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (C_{ij} - \delta_{ij}) - \varepsilon_r \delta_{ij} \quad (14)$$

en la que E_{ij} representa la porción elástica de la deformación y ε_r es la deformación de la partícula (armadura) debido a la corrosión uniforme para cada una de las direcciones principales. Mayores detalles acerca del modelo desarrollado, sea de la formulación o de su aplicabilidad, pueden ser obtenidos en Felix (2018).

3. RESULTADOS

A fin de analizar la eficiencia del modelo desarrollado y validarlo, inicialmente se presentan dos simulaciones numéricas referentes a pruebas de laboratorio de elementos de concreto sometidos a corrosión acelerada. Luego, se analizan los efectos de la corrosión uniforme en una estructura de concreto armado por medio del modelo desarrollado. El análisis se hizo considerando dos ambientes, laboratorio (corrosión acelerada) y urbano (corrosión natural).

3.1 Análisis del desempeño y validación del modelo – Ejemplo 1

Para demostrar la eficiencia del modelo desarrollado vía MEFP para representación de la expansión del concreto debido a la corrosión uniforme, y en especial, de la formación de los productos de corrosión, se presenta inicialmente la modelización de una placa de concreto reforzado bajo corrosión uniforme acelerada, la cual fue experimentalmente analizada por Nguyen et al. (2007).

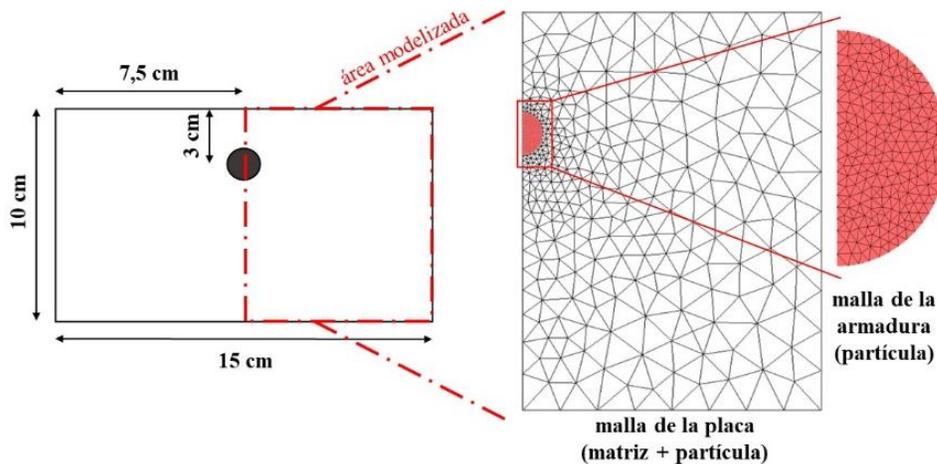


Figura 6. Geometría y discretización empleadas en la modelización.

La placa contiene una armadura con diámetro de 10 mm localizada en la región central, conforme se muestra en la Figura 6 y fue producida con concreto de resistencia a compresión de 39 MPa y acero con límite de proporcionalidad de 500 MPa.

Para lograrse la prueba de corrosión acelerada, Nguyen et al. (2007) sometieron la placa de concreto reforzado, tras curado húmedo de 28 días, a una corriente con densidad constante de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ por 92 horas.

Para la modelización numérica, solo la mitad de la placa de concreto fue simulada (ver Figura 6), debido a la simetría del problema. La placa fue discretizada por medio de un elemento compuesto particulado, siendo empleados 680 elementos finitos triangulares para la representación de la matriz de concreto y 826 elementos finitos triangulares para la discretización de la armadura.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros aplicados para modelización del problema, los cuales fueron extraídos de Nguyen et al. (2007).

Tabla 1. Parámetros de entrada del modelo de corrosión.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del acero	7860	kg/m ³
Valencia	2	-
Razón entre densidad del acero y de los productos de corrosión	3.7	-
Módulo de elasticidad de los productos de corrosión	0.15	GPa
Masa atómica del acero	55.84	-
Razón en volumen de la expansión de los productos de corrosión	3.7	-

Se consideró el comportamiento del concreto como elástico-lineal, con módulo de elasticidad de 25 GPa y coeficiente de Poisson de 0.2. Para el acero, el módulo de elasticidad adoptado fue de 210 GPa y el coeficiente de Poisson de 0.3.

En la Figura 7.a se muestra la deformación medida en un punto situado en la región superior de la placa, obtenida por medio del modelo propuesto y, experimentalmente, en Nguyen et al. (2007).

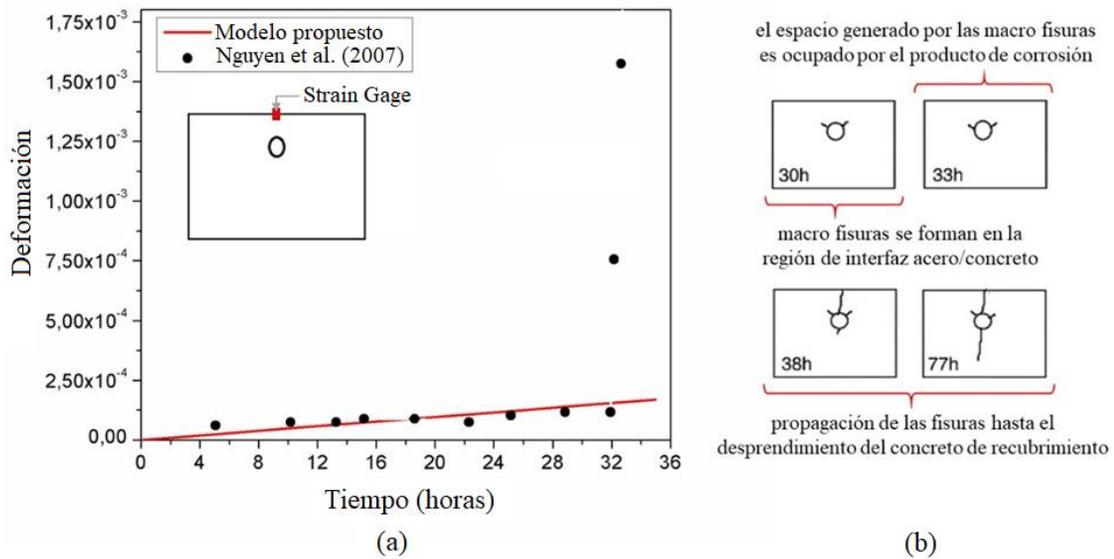


Figura 7. Análisis de la (a) deformación y (b) de la fisuración de la placa de concreto obtenidas por el modelo y comparadas a los resultados experimentales de Nguyen et al. (2007).

Al comparar las deformaciones observadas experimentalmente con las obtenidas por medio del modelo numérico implementado (Figura 7.a), se verificó que el modelo representa coherentemente la expansión del concreto debido a la corrosión uniforme, presentando un desvío medio de 4.12%. Aún acerca de la Figura 7.a, se observa que después del tiempo de 30 horas, hubo un aumento súbito en la deformación obtenida en Nguyen et al. (2007) y, a partir de ahí el modelo no fue capaz de representar coherentemente las deformaciones impuestas por la corrosión. Eso ocurre pues en este instante macro fisuras se forman en la región de interfaz entre el acero y el concreto, conforme es visto en los mapas de fisuras (Figura 7.b), descritos en Nguyen et al. (2007), para el problema en análisis. Aun así, delante del régimen elástico-lineal del concreto, el modelo describió de forma eficiente las deformaciones impuestas por la corrosión. La Figura 8 ilustra los desplazamientos horizontales y verticales de la placa de concreto tras 15 y 30 horas de corrosión acelerada, donde se muestra que solo a las 30 horas de corrosión deformaciones significativas pueden ser observadas en la superficie del concreto de recubrimiento.

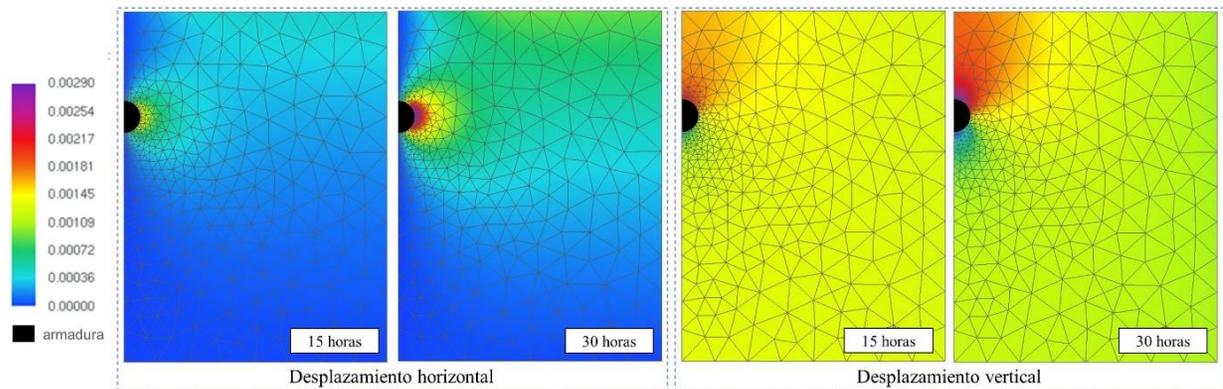


Figura 8. Mapa de colores referente a los campos de desplazamiento (leyenda en cm).

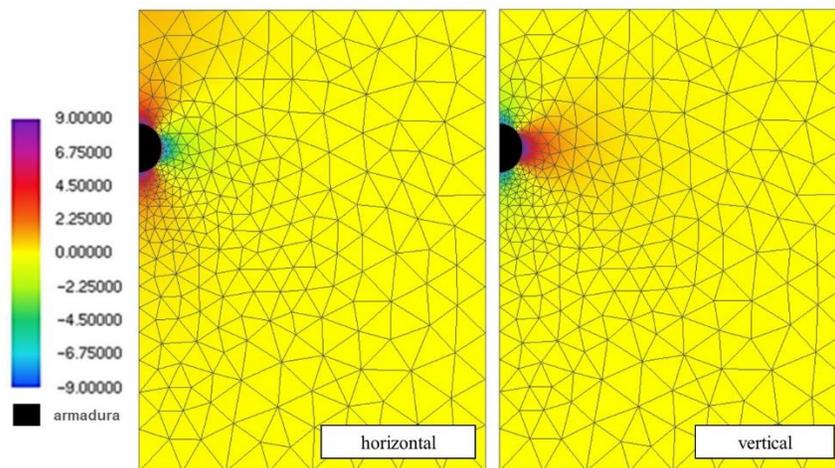


Figura 9. Mapa de colores referente al campo de tensión (leyenda en MPa).

En la Figura 9 se presentan los campos de tensión en la dirección horizontal y vertical de la placa de concreto tras 30 horas de corrosión acelerada. De acuerdo al esperado, se observa (Figura 9) que para el instante de 30 horas de corrosión, las tensiones presentan valores superiores a 3 MPa, lo que corresponde a la resistencia a tracción del concreto y implicaría en probable fisuración, corroborando las conclusiones de Nguyen et al. (2007), vistas en la Figura 7.b.

Por tanto, los resultados obtenidos en la modelización de la placa demuestran que el modelo representa coherentemente los efectos expansivos consecuentes de la corrosión uniforme, delante de la consideración del régimen elástico lineal de los materiales.

3.2 Análisis del desempeño y validación del modelo – Ejemplo 2

A continuación, para fines de validación del modelo numérico propuesto y considerando el acoplamiento de los modelos mecánicos y del mecanismo de corrosión, se modelizó la degradación impuesta por la corrosión en una viga de concreto reforzado (Figura 10) probada por Graeff (2007). La estructura consiste en un modelo reducido de una viga de sección rectangular, de dimensiones 7x14x130 cm, con luz entre los apoyos de 120 cm. En la Figura 10 se presenta el detallado de la viga y la carga impuesta.

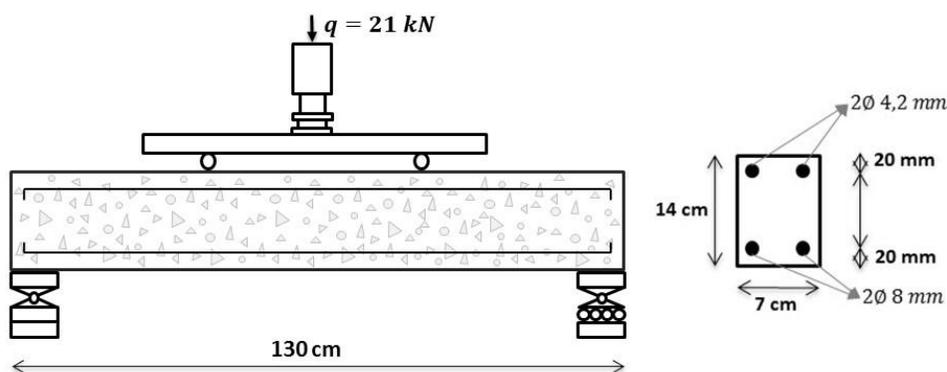


Figura 10. Detallado de la viga de concreto armado.

La discretización de malla de elementos finitos de la viga de concreto reforzado se hizo con 134 nudos y 34 elementos triangulares con orden de aproximación cúbica para la representación de la matriz de concreto y con 340 elementos de triangulares (partículas) para la representación de las armaduras.

En cuanto a las propiedades de los materiales, el concreto posee módulo de elasticidad de 2600.0 kN/cm², resistencia a compresión de 2.5 kN/cm², resistencia a tracción de 0.179 kN/cm² y coeficiente de Poisson de 0.2. Las armaduras, a su vez, poseen módulo de elasticidad de 210 GPa y resistencia a tracción de 500 MPa. En su modelo numérico, Graeff (2007) consideró el comportamiento no lineal del concreto y, como efecto de degradación de la corrosión, la pérdida de sección de acero y de adherencia entre el acero y el concreto.

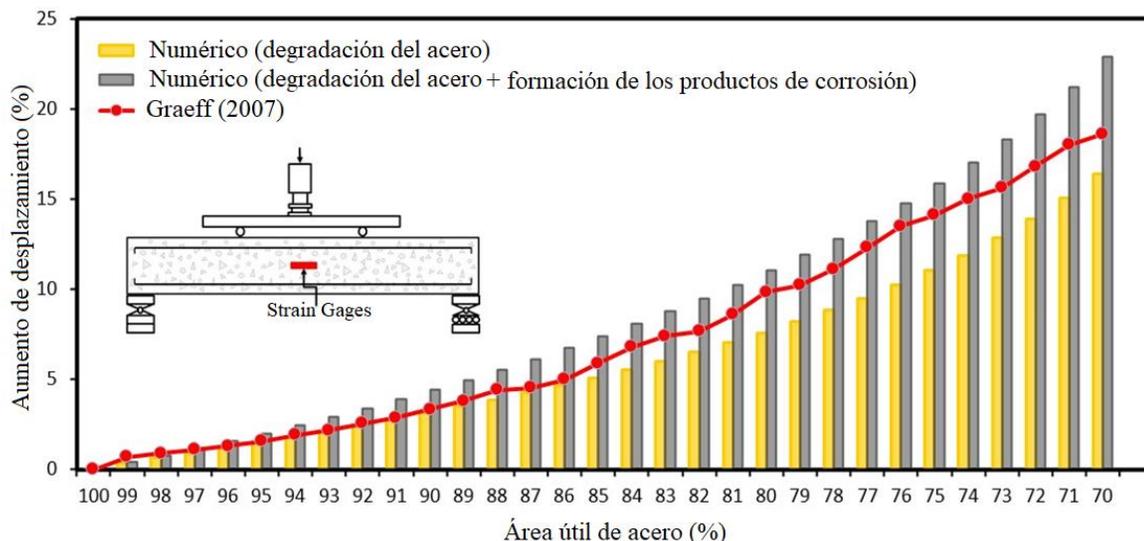


Figura 11. Comparación de desplazamiento máximo experimentado por la viga.

En este trabajo la simulación de la corrosión se hizo considerando dos situaciones, una en que los efectos de corrosión se relacionan solo con la pérdida de sección de acero, y otra en que la corrosión causa la pérdida de sección del acero y la expansión del concreto debido a la formación de productos de corrosión. Por medio de la Figura 11, se comparan los resultados logrados con este trabajo y los determinados en Graeff (2007). Se observa en la Figura 11 que es creciente la diferencia entre los resultados obtenidos por el modelo numérico presentado en este trabajo (en las dos simulaciones) y los obtenidos por Graeff (2007), a medida que aumenta la degradación de las armaduras. Una explicación para tal diferencia se debe al hecho de que Graeff (2007) adoptó en su modelo una ley constitutiva no lineal para el concreto y el acero.

Sin embargo, se observa que todas las curvas poseen comportamiento semejante con relación a desplazamientos de la estructura y que considerando el periodo inicial de corrosión (hasta el instante en que la armadura pierde 15% de área útil), para los casos en que los materiales aún trabajan en régimen elástico-lineal, el modelo implementado presenta resultados equivalentes a los de Graeff (2007).

Por medio de la Figura 11 es posible ver que la consideración combinada de más de un efecto de degradación de corrosión resulta en mayores desplazamientos de la viga y que, cuando se considera la expansión del concreto debido a la formación de los productos de corrosión, la pérdida de capacidad mecánica del concreto pasa a ser mayor con el avance de la corrosión. Tal hecho demuestra la importancia de consideración de este fenómeno en la modelización de la corrosión de estructuras de concreto.

3.3 Análisis del campo de desplazamiento de una viga de concreto reforzado sujeta a corrosión

La estructura analizada consiste en una viga biempotrada de concreto reforzado bajo corrosión uniforme. La simulación de esta viga tuvo como objetivo evaluar el efecto de la corrosión uniforme en la deformación de un elemento de concreto armado y sus efectos en los campos de tensión y desplazamiento. La geometría de la viga, sus dimensiones, cargas y condiciones de frontera se presentan en la Figura 12.

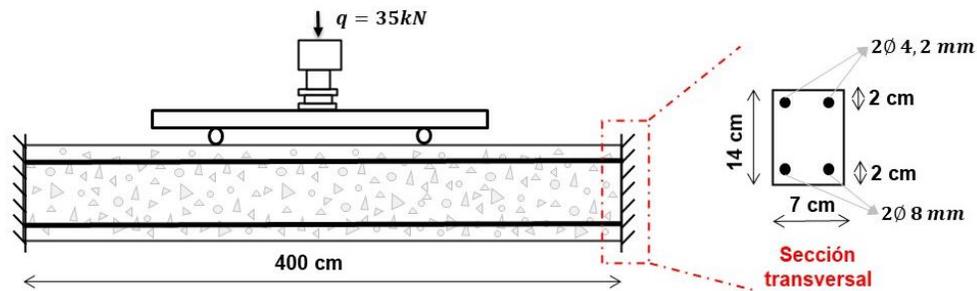


Figura 12. Geometría, condiciones de frontera y dimensiones de la viga.

Inicialmente la corrosión es impuesta de forma acelerada, empleando una corriente constante de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. A continuación, se evalúan los efectos de la corrosión simulada en ambiente de laboratorio (corrosión acelerada) comparándosela con los efectos de la corrosión natural, por medio de una corriente variable en el tiempo, determinada de acuerdo con (11). Los parámetros empleados en la formulación referente a la formación de los productos de corrosión, cuyos datos fueron extraídos de Nguyen et al. (2007) están descritos en la Tabla 1.

La discretización de la malla de elementos finitos de la viga de concreto reforzado se hizo con 2230 nudos y 468 elementos triangulares para la representación de la matriz de concreto y con 952 elementos de triangulares (partículas) para la representación de las armaduras. En cuanto a las propiedades de los materiales, el concreto posee módulo de elasticidad de $2600.0 \text{ kN}/\text{cm}^2$, resistencia a compresión de $2.5 \text{ kN}/\text{cm}^2$, resistencia a tracción de $0.179 \text{ kN}/\text{cm}^2$ y coeficiente de Poisson de 0.2. Las armaduras, por su vez, poseen módulo de elasticidad de $21000 \text{ kN}/\text{cm}^2$ y resistencia a tracción de $50 \text{ kN}/\text{cm}^2$.

En las Figura 13.a y 13.b se presentan los resultados referentes al desplazamiento vertical y a la tensión longitudinal (para tres diferentes regiones de la viga), considerando las solicitaciones químico-mecánicas (impuestas por la corrosión) y las solicitaciones provenientes de la carga.

Se nota en la Figura 13.a que tras 50 horas de corrosión acelerada, la estructura experimenta un aumento de desplazamiento de 0.26 mm (para abajo) para un punto situado en la parte inferior del centro de la viga (punto “I”), mientras que para un punto situado en la parte superior del centro de la viga (punto “S”), el aumento fue de 0.14 mm, casi la mitad del valor observado en el punto inferior.

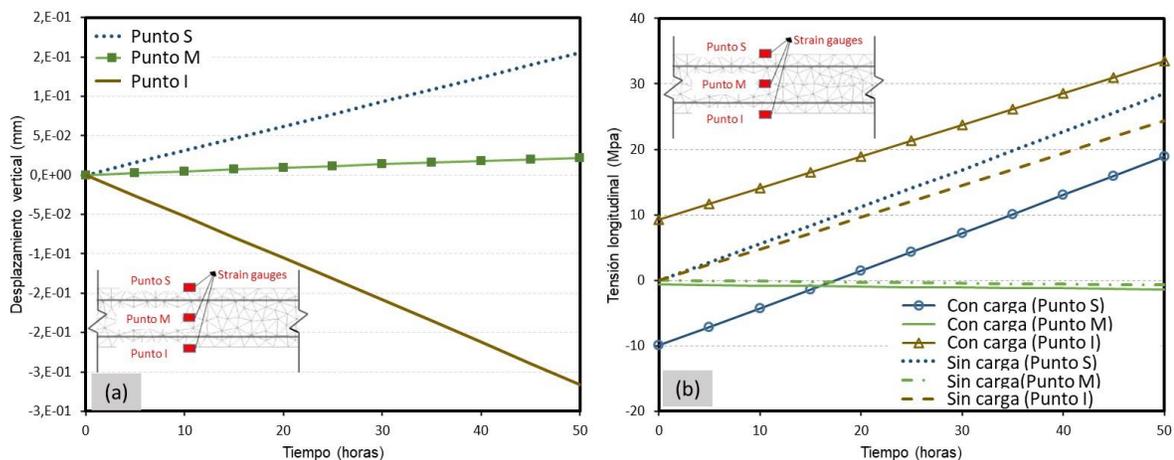


Figura 13. Respuestas del modelo para (a) el desplazamiento vertical y (b) tensión longitudinal.

Los resultados presentados en la Figura 13.b demuestran la influencia de la corrosión en el campo de tensión de la viga bajo corrosión cuando considerada la aplicación de una carga externa. Se observa para el caso de solo corrosión (sin carga) que las tensiones en los puntos “S” y “I” son

siempre de tracción (independientemente del tiempo de propagación), conforme apuntado por Balafas y Burgoyne (2010). Sin embargo, se nota que, en la presencia de una carga externa, el campo de tensión pasa a tener comportamiento controlado por el nivel de corrosión de las armaduras. Por ejemplo, el punto “S”, situado en la parte superior de la viga, tiene su estado de tensión alterado de compresión para tracción tras 15 horas de corrosión acelerada.

En otras palabras, se ha verificado que existe una influencia significativa de la corrosión en los campos de tensiones de vigas de concreto reforzado en servicio (con carga). Esa influencia tiene efectos secundarios que corroboran con la reducción de la vida útil de las estructuras, a ejemplo, la fisuración del recubrimiento del concreto. El estado de fisuración de un elemento de concreto armado es altamente dependiente de su estado de tensión y, en consecuencia, si la corrosión altera el campo de tensión de un elemento estructural, la misma puede modificar y/o acelerar sus mecanismos de ruptura.

En la Figura 14.a se muestra la configuración deformada de la viga considerando tres diferentes configuraciones de solicitaciones: (i) solo corrosión; (ii) solo carga; y (iii) acción conjunta de carga y corrosión. Se nota que en el caso donde las solicitaciones de la viga son exclusivamente resultado de la corrosión, todo el elemento estructural está traccionado, debido a formación de productos de corrosión. Se observa todavía, que los desplazamientos de la viga para el caso en que hay corrosión y carga externa, pueden ser descritos por sobreposición de las solicitaciones mecánicas (debido a la carga externa) y químico-mecánicas (resultado de la corrosión).

En la Figura 14.b se presentan los resultados para el desplazamiento vertical de la viga de concreto reforzado, considerando solo la corrosión natural.

Delante de los resultados de la simulación de la corrosión natural, los cuales se presentan en la Figura 14.b, se verificó que el desplazamiento del punto “I” tras 50 años de corrosión natural es de 0.47 mm, 79% mayor que el desplazamiento observado tras 50 horas de corrosión acelerada.

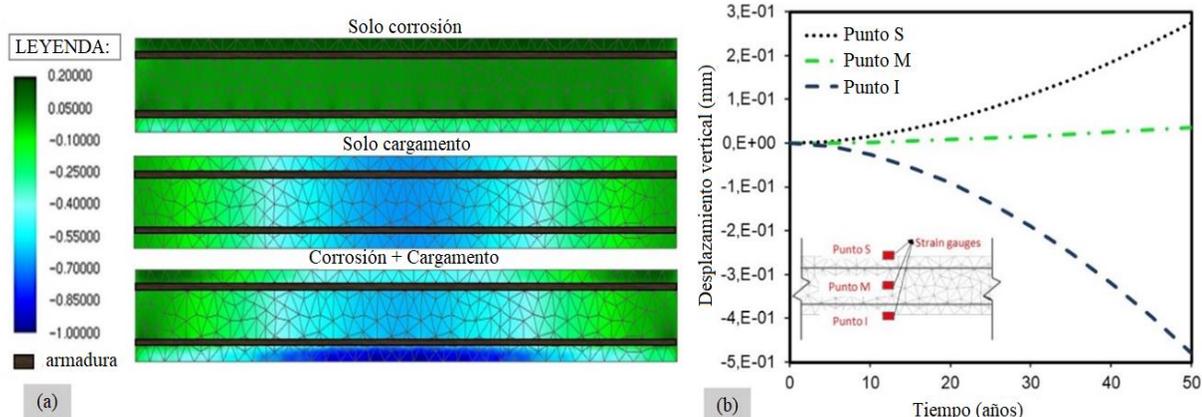


Figura 14. (a) Desplazamiento vertical de la viga: (a) a los 50 años y (b) a lo largo del tiempo (mm).

4. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados presentados referentes a la validación del modelo desarrollado, basado en el método de los elementos finitos posicional (MEFP), se puede concluir que el modelo representa coherentemente la expansión del concreto debido a la formación de los productos de corrosión. Además, delante de las simulaciones numéricas se concluye que:

- La corrosión tiende a alterar el campo de tensión de un elemento estructural, haciendo que algunas regiones del concreto pasen del estado de compresión a tracción;
- La consideración de una carga externa no altera la forma como los productos de corrosión se forman. Por el contrario, los efectos se sobreponen y tienden a ser significativos, a depender del nivel de corrosión de las armaduras;

- Los desplazamientos de la viga pueden ser descritos, antes de la fisuración, por la sobreposición de las solicitaciones mecánicas (debido a la carga externa) y químico-mecánicas (de la corrosión);
- Existen diferencias en el comportamiento mecánico de un elemento estructural cuando sometido a la corrosión natural o acelerada y la correlación entre los efectos causados por la corrosión en cada uno de los casos no es directa;
- Considerando un régimen de pequeñas deformaciones, la sobreposición de los efectos (propiedad muchas veces utilizada para la solución de problemas de estructuras y mecánicas) puede ser extendida para el análisis de la acción de corrosión en armaduras en estructuras de concreto reforzado, en cuanto el daño no sea significativo.

Por último, los resultados demuestran la aplicabilidad del modelo desarrollado como una alternativa viable y eficiente para la simulación de los elementos de concreto reforzado bajo corrosión uniforme, lo que contribuye con los estudios del área de patologías de las construcciones.

5. AGRADECIMIENTOS

A el “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 141078/2018 e CNPq 310564/2018-2)” y a la “Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) com el código de financiación 001” por el apoyo ofrecido a la investigación.

6. REFERÊNCIAS

- Almusallam, A. A. (2001), *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*. Construction and Building Materials. 15(8):361–368. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00009-5)
- Andrade, C., Alonso, C., Molina, F. J. (1993), *Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I Experimental test*. Materials and Structures. 26:453–464. <https://doi.org/10.1007/BF02472805>
- Balafas, I., Burgoyne, C. J. (2011), *Modeling the structural effects of rust in concrete cover*. Journal of Engineering Mechanics. Journal of Engineering Mechanics. 137(3):175–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000215)
- Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y., Ramanujam, S. (2005), *Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures*. Cement and Concrete Research. 35 (11):2203–2218. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.007>
- Coda, H. B. (2018), “*O método dos elementos finitos posicional: sólidos e estruturas – Não linearidade geométrica e dinâmica*”. Publisher: EESC-USP, Place of publication: São Carlos, SP, p. 284. ISBN: 9788580230680
- Du, X., Jin, L. (2014), *Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel*. Engineering Failure Analysis. 39:21–33. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.011>
- Felix, E. F. (2018), “*Modelagem da deformação do concreto armado devido à formação dos produtos de corrosão*”. Master Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos.
- Gentil, V. (2011), “*Corrosão*”. Editora LCT, 6ª edição, Rio de Janeiro, Brasil, p. 376.
- Graeff, A. G. (2007), “*Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado*”. Master Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Hansen, E. J., Saouma, V. E. (1999), *Numerical simulation of reinforced concrete deterioration: Part 2-steel corrosion and concrete cracking*. ACI Materials Journal. 96:331–338. ISSN: 0889-325X.
- Helene, P. (1986), “*Corrosão em armaduras para concreto armado*”. PINI, São Paulo, Brasil. p. 46.

- Isgor, O. B., Razaqpur, A. G. (2006), *Modelling steel corrosion in concrete structures*. Materials and Structures. 39(3):291–302. <https://doi.org/10.1007/s11527-005-9022-7>
- Jiang, L., Lin, B., Cai, Y. (2000), *A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete*. Cement and Concrete Research. 30(5):699–702. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00227-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00227-1)
- Kiani, K., Shodja, H. M. (2011), *Prediction of the penetrated rust into the microcracks of concrete caused by reinforcement corrosion*. Applied Mathematical Modelling. 35(5):2529–2543. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.039>
- Liu, Y., Weyers, R. E. (1998), *Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures*. Materials Journal. 95(6):675–680.
- Maruya, T., Hsu, K., Takeda, H., Tangtermsirikul, S. (2003), *Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement*. Journal of Advanced Concrete Technology. 1(2):147–160. <https://doi.org/10.3151/jact.1.147>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. Ibracon, São Paulo, Brasil, p. 751.
- Molina, F. J., Alonso, C., Andrade, C. (1993), *Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 2-Numerical model*. Materials and Structures. 26 :532–548. <https://doi.org/10.1007/BF02472864>
- Nguyen, Q. T., Caré, S., Millard, A., Berthaud, Y. (2007), *Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélérée*. Comptes Rendus Mécanique. 335(2): 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.01.005>
- Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G. (2014), *Modeling pullout resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three-dimensional finite element model*. Cement and Concrete Composites. 46:41–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.014>
- Paccola, R. R., Coda, H. B. (2016), *A direct FEM approach for particulate reinforced elastic solids*. Composite Structures. 45:235–251. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.062>
- Paul, S. C., Zijl, G. P. A. G. V. (2016), *Chloride-induced corrosion modelling of cracked reinforced SHCC*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 16(4):734–742. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.04.016>
- Ribeiro, D., Cunha, M., Helene, P. (2015), “*Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*”. Elsevier Brasil, Campus, São Paulo, Brasil, p. 272.
- Vanalli, L., Paccola, R. R., Coda, H. B. (2008), *A simply way to introduce fibers into FEM models*. Communications in Numerical Methods in Engineering. 24:585–603. <https://doi.org/10.1002/cnm.983>
- Yuan, Y., Ji, Y. (2009), *Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure*. Construction and Building Materials. 23(6):2461–2466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.026>
- Zhu, W. (2014), “*Effect of corrosion on the mechanical properties of the corroded reinforcement and the residual structural performance of the corroded beams*”, Doctoral Dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse).

Un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina

A. Luévanos Rojas^{1*}, S. López Chavarría¹, M. Medina Elizondo¹,
R. Sandoval Rivas¹, O. M. Farías Montemayor¹

*Autor de Contacto: arnulfol_2007@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.432>

Recepción: 24/08/2019 | Aceptación: 06/04/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Este trabajo muestra un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina sometidas a una carga axial y dos momentos flexionantes ortogonales por cada columna. El modelo toma en cuenta la presión real del suelo debajo de la zapata, y la metodología se basa en el principio de que la integración de la fuerza de corte es el momento. El diseño actual considera la presión máxima en todos los puntos de contacto. Este modelo se verifica por equilibrio de fuerzas de corte y momentos. La aplicación del modelo se presenta por medio de un ejemplo numérico. Por lo tanto, el modelo propuesto es el más apropiado, ya que genera un mejor control de calidad en los recursos utilizados.

Palabras clave: zapatas combinadas de esquina; modelo analítico para diseño; momentos flexionantes; cortante por flexión; cortante por penetración.

Citar como: Luévanos Rojas, A., López Chavarría, S., Medina Elizondo, M., Sandoval Rivas, R., Farías Montemayor, O. M. (2020), “Un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 317 – 335, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.432>

¹ Instituto de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México.

Editor asociado responsable de este artículo: Paulo Helene

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor Dr. Arnulfo Luévanos Rojas contribuyó en la idea original del artículo, desarrollo matemático del nuevo modelo y coordinó el trabajo en general. El autor Dra. Sandra López Chavarría contribuyó en la discusión de resultados. El autor Dr. Manuel Medina Elizondo contribuyó en la redacción del trabajo. El autor C. a Dr. Ricardo Sandoval Rivas contribuyó en la elaboración de las figuras. El autor C. a Dr. Oscar Mario Farías Montemayor contribuyó en la aplicación del modelo propuesto.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

An analytical model for the design of corner combined footings.

ABSTRACT

This work shows an analytical model for the design of corner combined footings subjected to an axial load and two orthogonal flexural moments per each column. It considers the real pressure on the ground below of the footing, and the methodology is based on the principle that the integration of the shear force is the moment. The current design considers the maximum pressure at all contact points. This model is verified by equilibrium of shear forces and moments. The application of the model is presented by means of a numerical example. Therefore, the proposed model is the most appropriated, because it generates better quality control in the resources used.

Keywords: corner combined footings; analytical model for design; flexural moments; flexural shearing; punching shearing.

Um modelo analítico para projeto de sapata de canto combinadas

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo analítico para o dimensionamento de sapatas angulares combinadas submetidas a uma carga axial e dois momentos fletores ortogonais para cada pilar que leva em consideração a pressão real do solo sob a sapata, e a metodologia é baseada no princípio de que a integração da força cortante é o momento. O projeto atual considera a pressão máxima em todos os pontos de contato. Este modelo é verificado pelo equilíbrio das forças de cisalhamento e momentos. A aplicação do modelo é apresentada por meio de um exemplo numérico. Portanto, o modelo proposto é o mais adequado, pois gera um melhor controle de qualidade dos recursos utilizados.

Palavras-chave: sapatas combinadas de canto; modelo analítico para projeto; momentos de flexão; cisalhamento por flexão; cisalhamento por punção.

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.

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

1. INTRODUCCION

Una cimentación o más comúnmente llamada base que es el elemento de una estructura arquitectónica que la conecta al suelo, y que transfiere las cargas de la estructura al suelo. Las cimentaciones se dividen en dos tipos, como poco profundas y profundas (Bowles, 2001; Das et al., 2006).

Los tipos de cimentaciones poco profundas para las columnas son de cinco tipos principales: 1) zapatas corridas; 2) zapatas aisladas; 3) zapatas combinadas que soportan dos o más columnas; 4) zapatas de correa o voladizo; 5) losas de cimentación o balsas que cubren toda el área de la cimentación (Bowles, 2001).

Una zapata combinada es necesaria para soportar una columna que se localiza muy cerca del borde de una línea de propiedad para no invadir la propiedad adyacente. La zapata combinada puede ser una losa de espesor uniforme o una viga en T invertida. Si el tipo de losa de la zapata combinada se usa para soportar dos o más columnas (generalmente dos), la losa debe tener una forma rectangular, trapezoidal o en forma de T cuando una columna está más cargada que la otra (Kurian, 2005; Punmia et al., 2007; Varghese, 2009).

La presión del suelo debajo de una zapata depende del tipo de suelo, la rigidez relativa del suelo y la zapata, y la profundidad de la cimentación al nivel de contacto entre la zapata y el suelo.

La Figura 1 muestra la distribución de presión del suelo debajo de la zapata según el tipo de suelo y la rigidez de la zapata (Bowles, 2001).

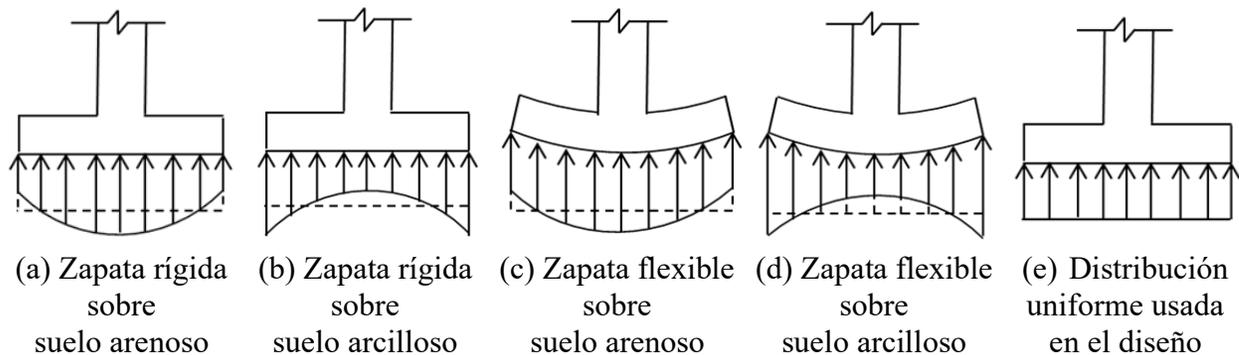


Figura 1. Presión debajo de la zapata

Los estudios sobre estructuras de cimientos y modelos matemáticos para zapatas se han investigado con éxito en varios problemas de ingeniería geotécnica. Las principales contribuciones de varios investigadores en la última década son: “Comportamiento de zapatas rectangulares cargadas repetidamente sobre arena reforzada” (El Sawwaf y Nazir, 2010); “Vibración no lineal de placas compuestas híbridas sobre cimentaciones elásticas” (Chen et al., 2011); “Tablas de diseño estocástico para la capacidad de carga de zapatas” (Shahin y Cheung, 2011); “Optimización modificada del enjambre de partículas para un diseño óptimo de zapata extendida y muro de contención” (Khajehzadeh et al., 2011); “Diseño de zapatas aisladas de forma rectangular utilizando un nuevo modelo” (Luévanos-Rojas et al., 2013); “Diseño de zapatas aisladas de forma circular utilizando un nuevo modelo” (Luévanos-Rojas, 2014a); “Diseño de zapatas combinadas de lindero de forma rectangular utilizando un nuevo modelo” (Luévanos-Rojas, 2014b); “Determinación de los estados límite últimos de cimientos superficiales utilizando el enfoque de programación de expresión génica (GEP)” (Tahmasebi poor et al., 2015); “Diseño de zapatas combinadas de lindero de forma trapezoidal utilizando un nuevo modelo” (Luévanos-Rojas, 2015); “Nuevo método iterativo para calcular el esfuerzo en la base de zapatas bajo flexión biaxial” (Aydogdu, 2016); “Un estudio comparativo para el diseño de zapatas aisladas rectangulares y

circulares utilizando nuevos modelos” (Luévanos-Rojas, 2016a); “Influencia de la rigidez de las zapatas en la resistencia al punzonamiento” (Fillo et al., 2016); “Un nuevo modelo para el diseño de zapatas combinadas rectangulares de lindero con dos lados opuestos restringidos” (Luévanos-Rojas, 2016b); “Diseño estructural de zapatas de columna aisladas” (Abdrabbo et al., 2016); “Diseño óptimo para zapatas rectangulares aisladas utilizando la presión real del suelo” (Luévanos-Rojas et al., 2017a); “Análisis de elemento finito y experimental de zapatas de diferentes formas sobre arena” (Anil et al., 2017); “Un estudio comparativo para el diseño de zapatas combinadas de formas trapezoidales y rectangulares utilizando nuevos modelos” (Luévanos-Rojas et al., 2017b); “Rendimiento de zapatas aisladas y plegadas” (El-kady y Badrawi, 2017); “Análisis y diseño de varios tipos de zapatas aisladas” (Balachandar y Narendra Prasad, 2017); “Un nuevo modelo para zapatas combinadas en forma de T Parte II: Modelo matemático para el diseño” (Luévanos-Rojas et al., 2018); “Resistencia al corte por punzonamiento de zapatas de concreto armado: evaluación del código de diseño” (Santos et al., 2018); “Efecto de los cimientos del suelo sobre la respuesta a la vibración de los cimientos de concreto usando un modelo matemático” (Dezhkam y Yaghfoori, 2018); “Análisis de no linealidad en el estudio de cimientos de rejillas poco profundas” (Ibrahim et al., 2018); “Modelado para la zapata combinada zapatas Parte II: modelo matemático para el diseño” (Yáñez-Palafox et al., 2019); “Método numérico para el análisis y diseño de zapata aislada cuadrada bajo carga concéntrica” (Magade e Ingle, 2019).

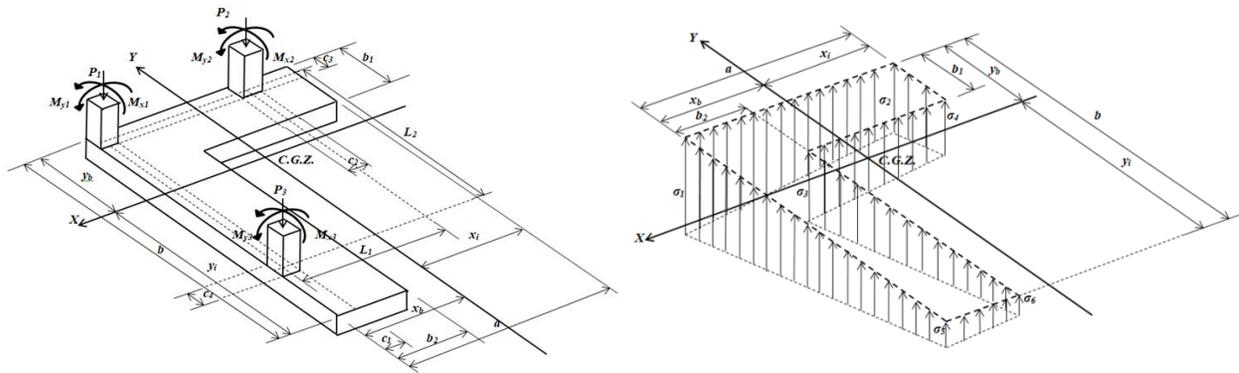
El documento relacionado con este trabajo es: “El dimensionamiento óptimo para las zapatas combinadas de esquina” para obtener únicamente el área mínima de la superficie de contacto en planta entre el suelo y la zapata (López-Chavarría et al., 2017), pero este trabajo no presenta el diseño de zapatas combinadas de esquina (peralte efectivo y acero de refuerzo).

Este documento muestra un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina sometidas a una carga axial y dos momentos flexionantes ortogonales por cada columna, y la presión del suelo sobre la zapata se presenta en función de los efectos generados por cada columna, y la metodología se basa en el principio de que la integración de la fuerza de corte es el momento. El diseño actual considera la presión máxima en todos los puntos de contacto, porque el centro de gravedad de la zapata se obliga a que coincida con la posición de la fuerza resultante de las cargas. Este modelo se verifica por equilibrio de fuerzas de corte y momentos. La principal ventaja del modelo propuesto es presentar el momento, el cortante por flexión y el cortante por punzonamiento mediante ecuaciones analíticas. Por lo tanto, el modelo propuesto será el más apropiado, ya que genera un mejor control de calidad en los recursos utilizados (mano de obra, materiales, equipo menor, etc), porque se ajusta a las condiciones de la presión real del suelo.

2. FORMULACION DEL MODELO PROPUESTO

Las secciones críticas para zapatas de acuerdo al código (ACI 318S-14, 2014) son: 1) El momento se localiza en la cara de la columna; 2) El cortante por flexión se localiza a una distancia “ d ” a partir de la cara de la columna; 3) El cortante por punzonamiento se presenta a una distancia de “ $d/2$ ” en las dos direcciones.

La carga axial y dos momentos flexionantes ortogonales (flexión biaxial) de cada columna aplicados sobre la zapata combinada de esquina se muestra en la Figura 2(a). La presión debajo de la zapata combinada de esquina que varía linealmente, y el esfuerzo en cada vértice de la zapata se presenta en la Figura 2(b).



(a) Cargas aplicadas sobre la zapata (b) Presión debajo de la zapata
 Figura 2. Zapata combinada de esquina

Los esfuerzos en la dirección principal (ejes “X” e “Y”) se obtienen:

$$\sigma(x, y) = \frac{R}{A} + \frac{M_{xT}y}{I_x} + \frac{M_{yT}x}{I_y} \quad (1)$$

donde: R , M_{xT} , M_{yT} , A , I_x , e I_y se muestran en (López-Chavarría et al., 2017).

Los esfuerzos debajo de la columna 2 (ejes “X₂” e “Y₂”) se encuentran (ver Figura 3):

$$\sigma_{P_2}(x, y) = \frac{P_2}{w_2 b_1} + \frac{12[M_{x_2} + P_2(b_1 - c_3)/2]y}{w_2 b_1^3} + \frac{12M_{y_2}x}{w_2^3 b_1} \quad (2)$$

Los esfuerzos debajo de la columna 3 (ejes “X₃” e “Y₃”) se obtienen (ver Figura 3):

$$\sigma_{P_3}(x, y) = \frac{P_3}{w_3 b_2} + \frac{12[M_{y_3} + P_3(b_2 - c_1)/2]x}{w_3 b_2^3} + \frac{12M_{x_3}y}{w_3^3 b_2} \quad (3)$$

donde: w_2 y w_3 son los anchos de la superficie de análisis en las columnas 2 y 3: $w_2 = c_2 + d$, $w_3 = c_4 + d$.

2.1 Cortantes por flexión y momentos flexionantes

Las secciones críticas para momentos flexionantes se presentan sobre los ejes: $a'-a'$, $b'-b'$, $c'-c'$, $d'-d'$, $e'-e'$, $f'-f'$, $g'-g'$, $h'-h'$, $i'-i'$ y $j'-j'$ (ver Figura 3). Las secciones críticas para cortantes por flexión se presentan sobre los ejes: $k'-k'$, $l'-l'$, $m'-m'$, $n'-n'$, $o'-o'$, $p'-p'$, $q'-q'$ y $r'-r'$ (ver Figura 4).

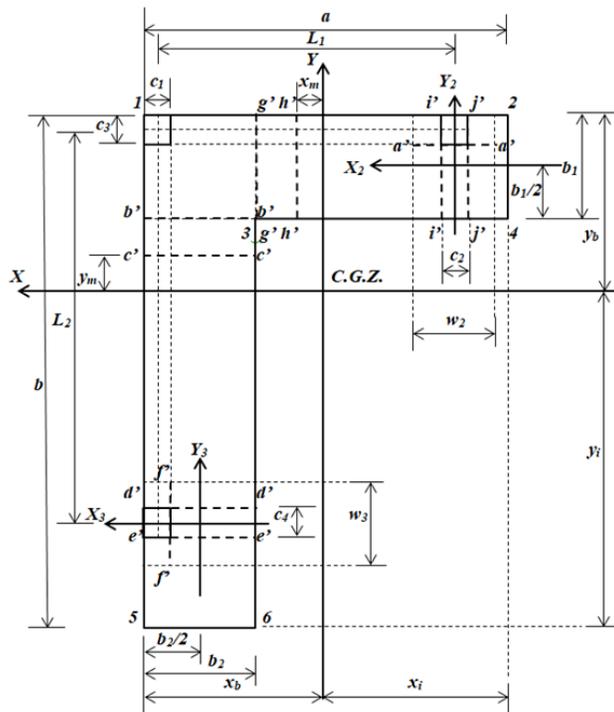


Figura 3. Secciones críticas para momentos flexionantes

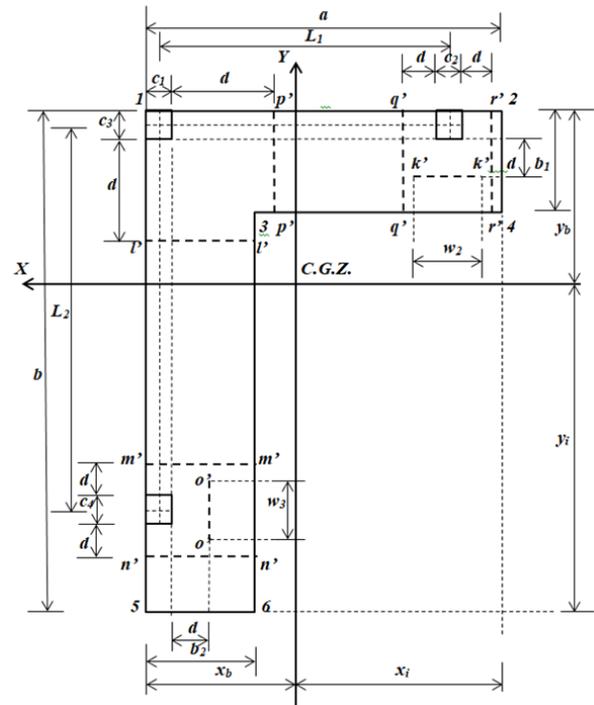


Figura 4. Secciones críticas para cortantes por flexión

Nota: Cuando los momentos alrededor del eje X se obtienen, los momentos alrededor del eje Y se consideran igual a cero. Cuando los momentos alrededor del eje Y se obtienen los momentos alrededor del eje X no influyen. Porque estos son ejes perpendiculares entre ellos.

2.1.1 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “ X_2 ” de $-b_1/2 \leq y_2 \leq b_1/2 - c_3/2$

La fuerza de corte “ V_{y_2} ” se encuentra a través del volumen de presión del área formada por el eje “ X_2 ” con un ancho “ $w_2 = c_2 + d$ ” y el extremo libre (lado interno) de la zapata:

$$V_{y_2} = - \int_{-b_1/2}^{y_2} \int_{-w_2/2}^{w_2/2} \sigma_{P_2}(x, y) dx dy$$

$$= - \frac{P_2 [12(b_1 - c_3)y_2^2 + 4b_1^2 y_2 - b_1^2(b_1 - 3c_3)]}{4b_1^3} - \frac{3M_{x_2}(4y_2^2 - b_1^2)}{2b_1^3} \quad (4)$$

Por integración de la ecuación (4) con respecto a “ y_2 ” se obtiene:

$$M_{X_2} = - \frac{P_2 y_2 [4(b_1 - c_3)y_2^2 + 2b_1^2 y_2 - b_1^2(b_1 - 3c_3)]}{4b_1^3} - \frac{M_{x_2} y_2 (4y_2^2 - 3b_1^2)}{2b_1^3} + C_1 \quad (5)$$

donde: M_{X_2} es el momento alrededor del eje “ X_2 ” y V_{y_2} es la fuerza de corte a una distancia “ y_2 ”. Ahora, sustituyendo “ $y_2 = -b_1/2$ ” y “ $M_{X_2} = 0$ ” en la ecuación (5) y la constante “ C_1 ” es:

$$C_1 = \frac{P_2(b_1 - 2c_3) + 4M_{x_2}}{8} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) y la ecuación de momentos generalizados se presenta como sigue:

$$M_{x_2} = - \frac{P_2 y_2 [4(b_1 - c_3) y_2^2 + 2b_1^2 y_2 - b_1^2 (b_1 - 3c_3)]}{4b_1^3} - \frac{M_{x_2} y_2 (4y_2^2 - 3b_1^2)}{2b_1^3} + \frac{P_2 (b_1 - 2c_3) + 4M_{x_2}}{8} \quad (7)$$

2.1.2 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “X” de $y_b - c_3/2 \leq y \leq y_b$

La fuerza de corte “ V_y ” se encuentra a través del volumen de presión del área formada por el eje “X” con un ancho “ a ” y el extremo libre (lado superior) de la zapata:

$$V_y = - \int_y^{y_b} \int_{x_b-a}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy = - \frac{Ra(y_b - y)}{A} - \frac{M_{xT} a (y_b^2 - y^2)}{2I_x} - \frac{M_{yT} a (2x_b - a)(y_b - y)}{2I_y} \quad (8)$$

Por integración de la ecuación (8) con respecto a “ y ” se obtiene:

$$M_X = - \frac{Ray_1(2y_b - y)}{2A} - \frac{M_{xT} ay_1(3y_b^2 - y^2)}{6I_x} + C_2 \quad (9)$$

donde: M_X es el momento alrededor del eje “X” y V_y es la fuerza de corte a una distancia “ y ”. Ahora, sustituyendo “ $y = y_b$ ” y “ $M_X = 0$ ” en la ecuación (9) y la constante “ C_2 ” es:

$$C_2 = \frac{Ray_b^2}{2A} + \frac{M_{xT} ay_b^3}{3I_x} \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (9) y la ecuación de momentos generalizados se presenta como sigue:

$$M_X = \frac{Ra(y_b - y)^2}{2A} + \frac{M_{xT} a (2y_b^3 - 3y_b^2 y + y^3)}{6I_x} \quad (11)$$

Sustituyendo “ $y = y_b - c_3/2$ ” en la ecuación (11) para obtener el momento alrededor del eje ubicado en el centro de la columna 1 y 2 “ $M_{c_3/2}$ ”:

$$M_{c_3/2} = \frac{Rac_3^2}{8A} + \frac{M_{xT} ac_3^2 (6y_b - c_3)}{48I_x} \quad (12)$$

2.1.3 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “X” de $y_b - b_1 \leq y \leq y_b - c_3/2$

La fuerza de corte “ V_y ” se encuentra a través del volumen de presión del área formada por el eje “X” con un ancho “ a ” y el lado superior de la zapata:

$$\begin{aligned}
 V_y &= P_1 + P_2 - \int_y^{y_b} \int_{x_b-a}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy \\
 &= P_1 + P_2 - \frac{Ra(y_b - y)}{A} - \frac{M_{xT}a(y_b^2 - y^2)}{2I_x} - \frac{M_{yT}a(2x_b - a)(y_b - y)}{2I_y}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Por integración de la ecuación (13) con respecto a “y” se obtiene:

$$M_x = (P_1 + P_2)y - \frac{Ray_1(2y_b - y)}{2A} - \frac{M_{xT}ay_1(3y_b^2 - y^2)}{6I_x} + C_3 \tag{14}$$

Ahora, sustituyendo “ $y = y_b - c_3/2$ ” y “ $M_x = M_{c_3/2} - M_{x1} - M_{x2}$ ” en la ecuación (14) y la constante “ C_3 ” es:

$$C_3 = \frac{Ray_b^2}{2A} + \frac{M_{xT}ay_b^3}{3I_x} - (P_1 + P_2)\left(y_b - \frac{c_3}{2}\right) - M_{x1} - M_{x2} \tag{15}$$

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (14) y la ecuación de momentos generalizados se presenta como sigue:

$$M_x = \frac{Ra(y_b - y)^2}{2A} + \frac{M_{xT}a(2y_b^3 - 3y_b^2y + y^3)}{6I_x} - (P_1 + P_2)\left(y_b - y - \frac{c_3}{2}\right) - M_{x1} - M_{x2} \tag{16}$$

Sustituyendo “ $y = y_b - b_1$ ” en la ecuación (16) para obtener el momento alrededor del eje $b'-b'$ “ M_{b1} ”:

$$M_{b1} = \frac{Rab_1^2}{2A} + \frac{M_{xT}ab_1^2(3y_b - b_1)}{6I_x} - (P_1 + P_2)\left(b_1 - \frac{c_3}{2}\right) - M_{x1} - M_{x2} \tag{17}$$

2.1.4 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “X” de $y_b - L_2 - c_3/2 \leq y \leq y_b - b_1$

La fuerza de corte “ V_y ” se encuentra a través del volumen de presión del área formada por el eje “X” y el lado superior de la zapata:

$$\begin{aligned}
 V_y &= P_1 + P_2 - \int_{y_b-b_1}^{y_b} \int_{x_b-a}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy - \int_y^{y_b-b_1} \int_{x_b-b_2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy \\
 &= P_1 + P_2 - \frac{R[ab_1 + b_2(y_b - y - b_1)]}{A} \\
 &\quad - \frac{M_{xT}\{ab_1(2y_b - b_1) + b_2[(y_b - b_1)^2 - y^2]\}}{2I_x} \\
 &\quad - \frac{M_{yT}[ab_1(2x_b - a) + b_2(2x_b - b_2)(y_b - y - b_1)]}{2I_y}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Por integración de la ecuación (18) con respecto a “y” se obtiene:

$$M_x = (P_1 + P_2)y - \frac{Ry[2ab_1 + b_2(2y_b - y - 2b_1)]}{2A} - \frac{M_{xT}y\{3ab_1(2y_b - b_1) + b_2[3(y_b - b_1)^2 - y^2]\}}{6I_x} + C_4 \quad (19)$$

Ahora, sustituyendo “ $y = y_b - b_1$ ” y “ $M_x = M_{b1}$ ” en la ecuación (19) y la constante “ C_4 ” es:

$$C_4 = \frac{R[ab_1(2y_b - b_1) + b_2(y_b - b_1)^2]}{2A} + \frac{M_{xT}[ab_1(3y_b^2 - 3y_b b_1 + b_1^2) + b_2(y_b - b_1)^3]}{3I_x} - (P_1 + P_2)\left(y_b - \frac{c_3}{2}\right) - M_{x1} - M_{x2} \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación (20) en la ecuación (19) y la ecuación de momentos generalizados se presenta como sigue:

$$M_x = \frac{R[ab_1(2y_b - 2y - b_1) + b_2(y_b - y - b_1)^2]}{2A} - \frac{(P_1 + P_2)(2y_b - 2y - c_3)}{2} + \frac{M_{xT}ab_1[2(3y_b^2 - 3y_b b_1 + b_1^2) - 3y(2y_b - b_1)]}{6I_x} + \frac{M_{xT}b_2[y^3 + (y_b - b_1)^2(2y_b - 3y - 2b_1)]}{6I_x} - M_{x1} - M_{x2} \quad (21)$$

Sustituyendo “ $y = y_b - L_2 - c_3/2$ ” en la ecuación (21) para obtener el momento alrededor del eje localizado en el centro de la columna 3 “ M_{L2} ”:

$$M_{L_2} = \frac{R[ab_1(2L_2 + c_3 - b_1) + b_2(L_2 + c_3/2 - b_1)^2]}{2A} - (P_1 + P_2)L_2 + \frac{M_{xT}ab_1^2(3y_b - b_1)}{6I_x} + \frac{M_{xT}b_2[(y_b - L_2 - c_3/2)^3 - (y_b - b_1)^3]}{6I_x} + \frac{M_{xT}\{3[ay_b^2 - (a - b_2)(y_b - b_1)^2](L_2 + c_3/2 - b_1)\}}{6I_x} - M_{x1} - M_{x2} \quad (22)$$

2.1.5 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “X” de $y_b - b \leq y \leq y_b - L_2 - c_3/2$

La fuerza de corte “ V_y ” se encuentra a través del volumen de presión del área formada por el eje “X” y el lado superior de la zapata:

$$V_y = P_1 + P_2 + P_3 - \int_{y_b - b_1}^{y_b} \int_{x_b - a}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy - \int_y^{y_b - b_1} \int_{x_b - b_2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy = R - \frac{M_{yT}[ab_1(2x_b - a) + b_2(2x_b - b_2)(y_b - y - b_1)]}{2I_y} - \frac{R[ab_1 + b_2(y_b - y - b_1)]}{A} - \frac{M_{xT}\{ab_1(2y_b - b_1) + b_2[(y_b - b_1)^2 - y^2]\}}{2I_x} \quad (23)$$

Por integración de la ecuación (23) se obtiene:

$$M_x = Ry - \frac{R[2ab_1 + b_2(2y_b - y - 2b_1)]y}{2A} - \frac{M_{xT}[3ab_1(2y_b - b_1) + b_2[3(y_b - b_1)^2 - y^2]]y}{6I_x} + C_5 \quad (24)$$

Ahora, sustituyendo “ $y = y_b - L_2 - c_3/2$ ” y “ $M_x = M_{L_2} - M_{x_3}$ ” y la constante “ C_5 ” es:

$$C_5 = \frac{R[ab_1(2y_b - b_1) + b_2(y_b - b_1)^2]}{2A} + \frac{M_{xT}[ay_b^3 - (a - b_2)(y_b - b_1)^3]}{3I_x} + P_3L_2 - \frac{R(2y_b - c_3)}{2} - M_{x_1} - M_{x_2} - M_{x_3} \quad (25)$$

Sustituyendo la ecuación (25) en la ecuación (24) y la ecuación de momentos flexionantes generalizados se presenta como sigue:

$$M_x = P_3L_2 - \frac{R[b_2y(2y_b - y - 2b_1) - ab_1(2y_b - 2y - b_1) - b_2(y_b - b_1)^2]}{2A} - R\left(y_b - y - \frac{c_3}{2}\right) + \frac{M_{xT}[ay_b^3 - (a - b_2)(y_b - b_1)^3]}{3I_x} - \frac{M_{xT}\{3ab_1(2y_b - b_1) + b_2[3(y_b - b_1)^2 - y^2]\}y}{6I_x} - M_{x_1} - M_{x_2} - M_{x_3} \quad (26)$$

En los siguientes apartados para obtener las ecuaciones de los cortantes por flexión y los momentos generalizados se emplea el mismo procedimiento usado anteriormente. Por lo tanto, las ecuaciones de los cortantes por flexión y los momentos generalizados se muestran a continuación.

2.1.6 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “ Y_3 ” de $-b_2/2 \leq x_3 \leq b_2/2 - c_1/2$

$$V_{x_3} = - \int_{-w_3/2}^{w_3/2} \int_{-b_2/2}^{x_3} \sigma_{P_3}(x, y) dx dy = - \frac{P_3[12(b_2 - c_1)x_3^2 + 4b_2^2x_3 - b_2^2(b_2 - 3c_1)]}{4b_2^3} - \frac{3M_{y_3}(4x_3^2 - b_2^2)}{2b_2^3} \quad (27)$$

$$M_{Y_3} = - \frac{P_3x_3[4(b_2 - c_1)x_3^2 + 2b_2^2x_3 - b_2^2(b_2 - 3c_1)]}{4b_2^3} - \frac{M_{y_3}x_3(4x_3^2 - 3b_2^2)}{2b_2^3} + \frac{P_3(b_2 - 2c_1) + 4M_{y_3}}{8} \quad (28)$$

2.1.7 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “ Y ” de $x_b - c_1/2 \leq x \leq x_b$

$$V_x = - \int_{y_b - b}^{y_b} \int_x^{x_b} \sigma(x, y) dx dy = - \frac{Rb(x_b - x)}{A} - \frac{M_{xT}b(2y_b - b)(x_b - x)}{2I_x} - \frac{M_{yT}b(x_b^2 - x^2)}{2I_y} \quad (29)$$

$$M_Y = \frac{Rb(x_b - x)^2}{2A} + \frac{M_{yT}b(2x_b^3 - 3x_b^2x + x^3)}{6I_y} \quad (30)$$

2.1.8 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “Y” de $x_b - b_2 \leq x \leq x_b - c_1/2$

$$\begin{aligned} V_x &= P_1 + P_3 - \int_{y_b-b}^{y_b} \int_x^{x_b} \sigma(x, y) dx dy \\ &= P_1 + P_3 - \frac{Rb(x_b - x)}{A} - \frac{M_{xT}b(2y_b - b)(x_b - x)}{2I_x} - \frac{M_{yT}b(x_b^2 - x^2)}{2I_y} \end{aligned} \quad (31)$$

$$M_Y = \frac{Rb(x_b - x)^2}{2A} + \frac{M_{yT}b(2x_b^3 - 3x_b^2x + x^3)}{6I_y} - (P_1 + P_3) \left(x_b - x - \frac{c_1}{2}\right) - M_{y1} - M_{y3} \quad (32)$$

2.1.9 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “Y” de $x_b - L_1 - c_1/2 \leq x \leq x_b - b_2$

$$\begin{aligned} V_x &= P_1 + P_3 - \int_{y_b-b}^{y_b} \int_{x_b-b_2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy - \int_{y_b-b_1}^{y_b} \int_x^{x_b-b_2} \sigma(x, y) dx dy \\ &= P_1 + P_3 - \frac{R[bb_2 + b_1(x_b - x - b_2)]}{A} \\ &\quad - \frac{M_{xT}[bb_2(2y_b - b) + b_1(2y_b - b_1)(x_b - x - b_2)]}{2I_x} \\ &\quad - \frac{M_{yT}\{bb_2(2x_b - b_2) + b_1[(x_b - b_2)^2 - x^2]\}}{2I_y} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} M_Y &= \frac{R[bb_2(2x_b - 2x - b_2) + b_1(x_b - x - b_2)^2]}{2A} - \frac{(P_1 + P_3)(2x_b - 2x - c_1)}{2} \\ &\quad + \frac{M_{yT}bb_2[2(3x_b^2 - 3x_b b_2 + b_2^2) - 3x(2x_b - b_2)]}{6I_y} \\ &\quad + \frac{M_{yT}b_1[x^3 + (x_b - b_2)^2(2x_b - 3x - 2b_2)]}{6I_y} - M_{y1} - M_{y3} \end{aligned} \quad (34)$$

2.1.10 Cortantes por flexión y momentos sobre un eje paralelo al eje “Y” de $x_b - a \leq x \leq x_b - L_1 - c_1/2$

$$\begin{aligned} V_x &= P_1 + P_2 + P_3 - \int_{y_b-b}^{y_b} \int_{x_b-b_2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy - \int_{y_b-b_1}^{y_b} \int_x^{x_b-b_2} \sigma(x, y) dx dy \\ &= R - \frac{M_{xT}[bb_2(2y_b - b) + b_1(2y_b - b_1)(x_b - x - b_2)]}{2I_x} \\ &\quad - \frac{M_{yT}\{bb_2(2x_b - b_2) + b_1[(x_b - b_2)^2 - x^2]\}}{2I_y} - \frac{R[bb_2 + b_1(x_b - x - b_2)]}{A} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 M_Y = P_2 L_1 - & \frac{R[b_1 x(2x_b - x - 2b_2) - b b_2(2x_b - 2x - b_2) - b_1(x_b - b_2)^2]}{3I_y} \\
 & - R\left(x_b - x - \frac{c_1}{2}\right) + \frac{M_{yT}[bx_b^3 - (b - b_1)(x_b - b_2)^3]}{3I_y} \\
 & - \frac{M_{yT}\{3bb_2(2x_b - b_2) + b_1[3(x_b - b_2)^2 - x^2]\}x}{6I_y} - M_{y1} - M_{y2} - M_{y3}
 \end{aligned} \quad (36)$$

2.2 Cortantes por penetración o punzonamiento

Las secciones críticas para cortantes por penetración se muestran en la Figura 5.

2.2.1 Cortantes por penetración para la columna de esquina (columna 1)

La sección crítica para la columna 1 se presenta en el perímetro formado por los puntos 1, 7, 8 y 9 de la zapata (ver Figura 5). El cortante por penetración se obtiene por la carga axial de la columna 1 menos el volumen de presión del área delimitada por los puntos 1, 7, 8 y 9:

$$\begin{aligned}
 V_{p1} = P_1 - & \int_{y_b - c_3 - d/2}^{y_b} \int_{x_b - c_1 - d/2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy \\
 = P_1 - & \frac{M_{xT}(2y_b - c_3 - d/2)(c_1 + d/2)(c_3 + d/2)}{2I_x} \\
 & - \frac{M_{yT}(2x_b - c_1 - d/2)(c_1 + d/2)(c_3 + d/2)}{2I_y} - \frac{R(c_1 + d/2)(c_3 + d/2)}{A}
 \end{aligned} \quad (37)$$

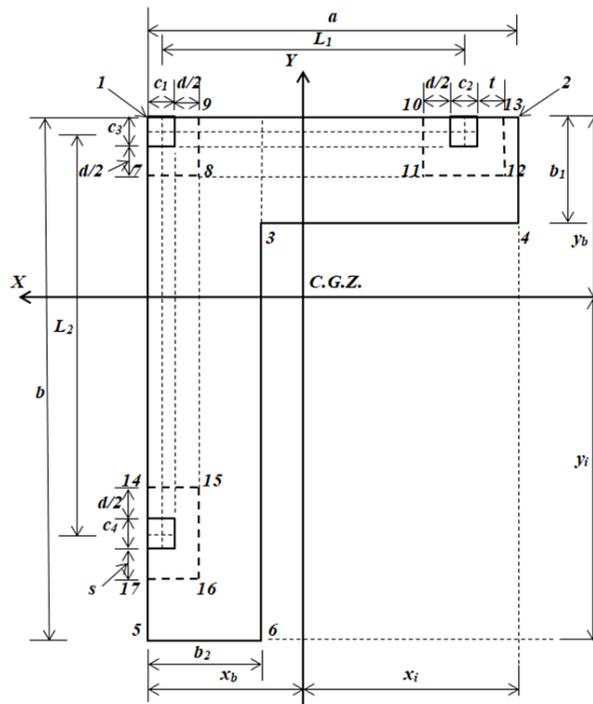


Figura 5. Secciones críticas para cortantes por penetración

2.2.2 Cortantes por penetración para la columna de un límite (columna 2)

La sección crítica para la columna 2 se presenta en el perímetro formado por los puntos 10, 11, 12 y 13 de la zapata (ver Figura 5). El cortante por penetración se obtiene por la carga axial de la columna 2 menos el volumen de presión del área delimitada por los puntos 10, 11, 12 y 13:

$$\begin{aligned}
 V_{p2} &= P_2 - \int_{y_b - c_3 - d/2}^{y_b} \int_{x_b - L_1 - (c_1 + c_2)/2 - t}^{x_b - L_1 - (c_1 - c_2)/2 + d/2} \sigma(x, y) dx dy \\
 &= P_2 - \frac{M_{yT}(c_2 + d/2 + t)(c_3 + d/2)(2x_b - 2L_1 - c_1 + d/2 - t)}{2I_y} \\
 &\quad - \frac{M_{xT}(c_2 + d/2 + t)(c_3 + d/2)(2y_b - c_3 - d/2)}{2I_x} \\
 &\quad - \frac{R(c_2 + d/2 + t)(c_3 + d/2)}{A}
 \end{aligned} \tag{38}$$

Nota: cuando $d/2 \leq a - L_1 - (c_1 + c_2)/2 \rightarrow t = d/2$, y cuando $d/2 > a - L_1 - (c_1 + c_2)/2 \rightarrow t = a - L_1 - (c_1 + c_2)/2$.

2.2.3 Cortantes por penetración para la columna de un límite (columna 3)

La sección crítica para la columna 3 se presenta en el perímetro formado por los puntos 14, 15, 16 y 17 de la zapata (ver Figura 5). El cortante por penetración se obtiene por la carga axial de la columna 3 menos el volumen de presión del área delimitada por los puntos 14, 15, 16 y 17:

$$\begin{aligned}
 V_{p3} &= P_3 - \int_{y_b - L_2 - (c_3 + c_4)/2 - s}^{y_b - L_2 - (c_3 - c_4)/2 + d/2} \int_{x_b - c_1 - d/2}^{x_b} \sigma(x, y) dx dy \\
 &= P_3 - \frac{M_{xT}(c_4 + d/2 + s)(c_1 + d/2)(2y_b - 2L_2 - c_3 + d/2 - s)}{2I_x} \\
 &\quad - \frac{M_{yT}(c_4 + d/2 + s)(c_1 + d/2)(2x_b - c_1 - d/2)}{2I_y} \\
 &\quad - \frac{R(c_4 + d/2 + s)(c_1 + d/2)}{A}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Nota: cuando $d/2 \leq b - L_2 - (c_3 + c_4)/2 \rightarrow s = d/2$, y cuando $d/2 > b - L_2 - (c_3 + c_4)/2 \rightarrow t = b - L_2 - (c_3 + c_4)/2$.

3. VERIFICACION DEL MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto en este documento se verifica como sigue:

- 1.- Para los momentos flexionantes sobre los ejes X_2 y X : Cuando se sustituye “ $y_2 = -b_1/2$ ” en la ecuación (7) se obtiene $M_{X2} = 0$, si se sustituye “ $y = y_b$ ” en la ecuación (11) se obtiene $M_X = 0$, y sustituyendo “ $y = y_b - b$ ” en la ecuación (26) se obtiene $M_X = 0$. Por lo tanto, las ecuaciones para los momentos flexionantes sobre los ejes X_2 y X cumplen con el equilibrio.
- 2.- Para los momentos flexionantes sobre los ejes Y_3 e Y : Cuando se sustituye “ $x_3 = -b_2/2$ ” en la ecuación (28) se obtiene $M_{Y3} = 0$, si se sustituye “ $x = x_b$ ” en la ecuación (30) se obtiene $M_Y = 0$, y sustituyendo “ $x = x_b - a$ ” en la ecuación (36) se obtiene $M_Y = 0$. Por lo tanto las ecuaciones para los momentos flexionantes sobre los ejes Y_3 e Y cumplen con el equilibrio.
- 3.- Para los cortantes por flexión sobre los ejes X_2 y X : Cuando se sustituye “ $y_2 = -b_1/2$ ” en la ecuación (4) se obtiene $V_{y2} = 0$, si se sustituye “ $y = y_b$ ” en la ecuación (8) se obtiene $V_y = 0$, y sustituyendo “ $y = y_b - b$ ” en la ecuación (23) se obtiene $V_y = 0$. Por lo tanto las ecuaciones para los cortantes por flexión sobre los ejes X_2 y X cumplen con el equilibrio.
- 4.- Para los momentos flexionantes sobre los ejes Y_3 e Y : Cuando se sustituye “ $x_3 = -b_2/2$ ” en la ecuación (27) se obtiene $V_{x3} = 0$, si se sustituye “ $x = x_b$ ” en la ecuación (29) se obtiene $V_x = 0$, y

sustituyendo “ $x = x_b - a$ ” en la ecuación (35) se obtiene $V_x = 0$. Por lo tanto, las ecuaciones para los cortantes por flexión sobre los ejes Y_3 e Y cumplen con el equilibrio.

4. APLICACION DEL MODELO PROPUESTO

El diseño de una zapata combinada de esquina que soporta tres columnas cuadradas se muestra a continuación con la siguiente información: las tres columnas son de 40×40 cm, $L_1 = 5.00$ m, $L_2 = 5.00$ m, H (profundidad de la zapata) = 2.0 m, $P_{D1} = 300$ kN, $P_{L1} = 200$ kN, $M_{Dx1} = 80$ kN-m, $M_{Lx1} = 70$ kN-m, $M_{Dy1} = 120$ kN-m, $M_{Ly1} = 80$ kN-m, $P_{D2} = 600$ kN, $P_{L2} = 400$ kN, $M_{Dx2} = 160$ kN-m, $M_{Lx2} = 140$ kN-m, $M_{Dy2} = 120$ kN-m, $M_{Ly2} = 80$ kN-m, $P_{D3} = 500$ kN, $P_{L3} = 400$ kN, $M_{Dx3} = 120$ kN-m, $M_{Lx3} = 80$ kN-m, $M_{Dy3} = 150$ kN-m, $M_{Ly3} = 100$ kN-m, $f'_c = 28$ MPa, $f_y = 420$ MPa, $q_a = 252$ kN/m², γ_c (densidad del concreto) = 24 kN/m³, γ_s (densidad de relleno del suelo) = 15 kN/m³. Las cargas y momentos que actúan sobre la zapata combinada de esquina son: $P_1 = 500$ kN-m, $M_{x1} = 150$ kN-m, $M_{y1} = 200$ kN-m, $P_2 = 1000$ kN, $M_{x2} = 300$ kN-m, $M_{y2} = 200$ kN-m, $P_3 = 900$ kN, $M_{x3} = 200$ kN-m, $M_{y3} = 250$ kN-m.

La capacidad de carga disponible del suelo se supone que es de $\sigma_{m\acute{a}x} = 213.00$ kN/m², porque a la capacidad de carga del suelo “ q_a ” se le resta el peso propio de la zapata (γ_c por el espesor de la zapata), y el peso propio del relleno del suelo (γ_s por el espesor del relleno).

Sustituyendo “ $\sigma_{m\acute{a}x}, L_1, L_2, P_1, M_{x1}, M_{y1}, P_2, M_{x2}, M_{y2}, P_3, M_{x3}, M_{y3}$ ” en las ecuaciones (30) a (42) del trabajo (López-Chavarría et al. 2017), y la solución por el software MAPLE-15 se obtiene: $A_{min} = 11.31$ m², $M_{xT} = -8.65$ kN-m, $M_{yT} = 9.49$ kN-m, $R = 2400$ kN, $a = 6.36$ m, $b = 5.95$ m, $b_1 = 1.00$ m, $b_2 = 1.00$ m, $\sigma_1 = 211.31$ kN/m², $\sigma_2 = 212.75$ kN/m², $\sigma_3 = 211.78$ kN/m², $\sigma_4 = 213.00$ kN/m², $\sigma_5 = 212.77$ kN/m², $\sigma_6 = 213.00$ kN/m².

Las dimensiones prácticas de la zapata combinada de esquina que soporta tres columnas cuadradas son: $a = 6.40$ m, $b = 6.00$ m, $b_1 = 1.00$ m, $b_2 = 1.00$ m. Ahora, las dimensiones prácticas para verificar los esfuerzos se sustituyen en el mismo software MAPLE-15, y la solución es: $A_{min} = 11.40$ m², $M_{xT} = 27.89$ kN-m, $M_{yT} = 7.89$ kN-m, $R = 2400$ kN, $a = 6.40$ m, $b = 6.00$ m, $b_1 = 1.00$ m, $b_2 = 1.00$ m, $\sigma_1 = 212.30$ kN/m², $\sigma_2 = 211.11$ kN/m², $\sigma_3 = 211.34$ kN/m², $\sigma_4 = 210.34$ kN/m², $\sigma_5 = 207.68$ kN/m², $\sigma_6 = 207.49$ kN/m².

Las propiedades geométricas de la zapata son: $x_b = 2.02$ m, $y_b = 1.82$ m, $I_x = 36.21$ m⁴, $I_y = 42.73$ m⁴.

Las cargas y momentos factorizados que actúan sobre la zapata son: $P_{u1} = 680$ kN, $M_{ux1} = 208$ kN-m, $M_{uy1} = 272$ kN-m, $P_{u2} = 1360$ kN, $M_{ux2} = 416$ kN-m, $M_{uy2} = 272$ kN-m, $P_{u3} = 1240$ kN, $M_{ux3} = 272$ kN-m, $M_{uy3} = 340$ kN-m. Las cargas y momentos resultantes factorizados por las ecuaciones (31) a (33) (López-Chavarría et al., 2017) se obtienen: $R_u = 3280$ kN, $M_{uxT} = -4.21$ kN-m, $M_{uyT} = 39.79$ kN-m.

El momento sobre el eje $a'-a'$ por la ecuación (7) se obtiene “ $M_{a'} = 289.15$ kN-m” en $y_2 = b_1/2 - c_3$. El momento sobre el eje $b'-b'$ por la ecuación (16) se obtiene “ $M_{b'} = -1335.85$ kN-m” en $y = y_b - b_1$. Ahora, sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (21) y derivando con respecto a “ y ”, esta se igual a cero para obtener la ubicación del momento máximo “ $y_m = 0.12$ m”, posteriormente se sustituye en la ecuación (21), y el momento es “ $M_{c'} = -1405.08$ kN-m”. El momento sobre el eje $d'-d'$ por la ecuación (21) se obtiene “ $M_{d'} = 168.08$ kN-m” en $y = y_b - L_2 - c_3/2 + c_4/2$. El momento sobre el eje $e'-e'$ por la ecuación (26) se obtiene “ $M_{e'} = 51.87$ kN-m” en $y = y_b - L_2 - c_3/2 - c_4/2$.

El momento sobre el eje $f'-f'$ por la ecuación (28) se obtiene “ $M_{f'} = 238.18$ kN-m” en $x_3 = b_2/2 - c_1$. El momento sobre el eje $g'-g'$ por la ecuación (32) se obtiene “ $M_{g'} = -1280.14$ kN-m” en $x = x_b - b_2$. Ahora, sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (34) y derivando con respecto a “ x ”, esta se igual a cero para obtener la ubicación del momento máximo “ $x_m = 0.37$ m”, posteriormente se sustituye en la ecuación (34), y el momento es “ $M_{h'} = -1339.60$ kN-m”. El

momento sobre el eje $i'-i'$ por la ecuación (34) se obtiene “ $M_i = 278.39 \text{ kN-m}$ ” en $x = x_b - L_1 - c_1/2 + c_2/2$. El momento sobre el eje $j'-j'$ por la ecuación (36) se obtiene “ $M_j = 141.97 \text{ kN-m}$ ” en $x = x_b - L_1 - c_1/2 - c_2/2$.

El peralte efectivo debajo de la columna 2 es: 18.33 cm. El peralte efectivo para el momento máximo “ M_c ” es: 46.42 cm. El peralte efectivo debajo de la columna 3 es: 16.63 cm. El peralte efectivo para el momento máximo “ M_h ” es: 45.32 cm. El peralte efectivo después de realizar varias propuestas es: $d = 92.00 \text{ cm}$, $r = 8.00 \text{ cm}$ y $t = 100 \text{ cm}$.

La Tabla 1 muestra los cortantes por flexión que actúan sobre la zapata y los resistidos por el concreto de acuerdo al código (ACI 318S-14).

Tabla 1. Cortantes por flexión.

Ejes	Coordenadas	Ancho de análisis <i>cm</i>	Cortantes por flexión	
			Actuantes <i>kN</i>	Resistidos <i>kN</i>
k'	$y_2 = b_1/2 - c_3 - d$	132	0*	928.56
l'	$y = y_b - c_3 - d$	100	114.14	703.45
m'	$y = y_b - c_3/2 - L_2 + c_4/2 + d$	100	- 684.15	703.45
n'	$y = y_b - c_3/2 - L_2 - c_4/2 - d$	100	0*	703.45
o'	$x_3 = b_2/2 - c_1 - d$	132	0*	928.56
p'	$x = x_b - c_1 - d$	100	92.11	703.45
q'	$x = x_b - c_1/2 - L_1 + c_2/2 + d$	100	- 699.81	703.45
r'	$y = y_b - c_3/2 - L_2 - c_4/2 - d$	100	22.68	703.45

* El eje se ubica afuera del área de la zapata.

La Tabla 2 muestra los cortantes por penetración que actúan sobre la zapata y los resistidos por el concreto de acuerdo al código (ACI 318S-14).

Tabla 2. Cortantes por penetración.

Columna	Perímetro crítico	Cortantes por penetración			
		Actuantes <i>kN</i>	Resistidos <i>kN</i>		
1	$b_0 = c_1 + c_3 + d$	466.23	3629.81	7500.95	2348.70
2	$b_0 = c_2 + 2c_3 + 2d$	1036.93	6415.49	13112.93	4151.20
3	$b_0 = 2c_1 + c_4 + 2d$	911.26	6415.49	13112.93	4151.20

La Tabla 3 muestra el acero de refuerzo de la zapata combinada de esquina (ACI 318S-14).

Tabla 3. Acero de refuerzo de la zapata.

Acero de refuerzo			Área <i>cm²</i>
Dirección del eje “Y”	Acero en la parte superior con un ancho b_2	Acero principal	42.10
		Acero mínimo	30.67
		Acero propuesto	45.63 (9Ø1”)
	Acero en la parte superior con un ancho $a - b_2$	Acero por temperatura	97.20
		Acero propuesto	99.75 (35Ø3/4”)
		Acero en la parte inferior con un ancho b_2	Acero principal
	Acero mínimo		30.67
	Acero propuesto		35.49 (7Ø1”)

	Acero debajo de la columna 2 con un ancho w_2	Acero principal	8.37
		Acero mínimo	40.48
		Acero propuesto	42.75 (15Ø3/4")
	Acero en la parte inferior con un ancho $a - b_2 - w_2$	Acero por temperatura	73.44
		Acero propuesto	74.10 (26Ø3/4")
Dirección del eje "X"	Acero en la parte superior con un ancho b_1	Acero principal	40.06
		Acero mínimo	30.67
		Acero propuesto	40.56 (8Ø1")
	Acero en la parte superior con un ancho $b - b_1$	Acero por temperatura	90.00
		Acero propuesto	91.20 (32Ø3/4")
	Acero en la parte inferior con un ancho b_1	Acero principal	8.07
		Acero mínimo	30.67
		Acero propuesto	35.49 (7Ø1")
	Acero debajo de la columna 3 con un ancho w_3	Acero principal	6.88
		Acero mínimo	40.48
		Acero propuesto	42.75 (15Ø3/4")
Acero en la parte inferior con un ancho $b - b_1 - w_3$	Acero por temperatura	66.24	
	Acero propuesto	68.40 (24Ø3/4")	

Los efectos que rigen el espesor de las zapatas son los momentos flexionantes, los cortantes por flexión y los cortantes por penetración, y el acero de refuerzo se diseña por los momentos. Para el espesor del ejemplo numérico rige el cortante por flexión en el eje $q'-q'$ (ver Tabla 1).

La Tabla 4 muestra la longitud mínima de desarrollo para barras deformadas " l_d " y la longitud disponible " l_a ". Entonces, la longitud disponible es mayor que la longitud mínima de desarrollo en las dos direcciones (parte superior e inferior) (ver Tabla 4). Por lo tanto, no se requieren ganchos para la zapata combinada de esquina.

Tabla 4. Longitud mínima de desarrollo y la longitud disponible.

Localización del acero	ψ_t	$\psi_e = \lambda$	Longitud de desarrollo cm	Longitud disponible	
				Dirección del eje "X" cm	Dirección del eje "Y" cm
Parte superior	1.3	1.0	154.17	165	170
Parte inferior	1.0	1.0	96.00	140	100

La Figura 6 muestra en detalle el acero de refuerzo y las dimensiones de la zapata combinada de esquina.

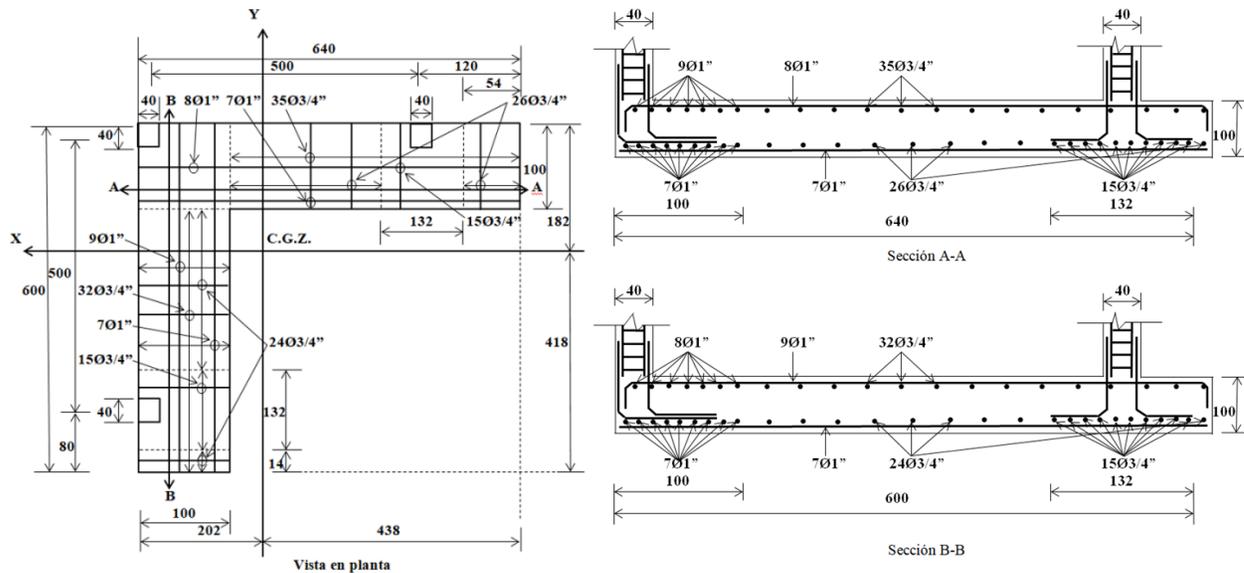


Figura 6. Diseño final de la zapata combinada de esquina

5. CONCLUSIONES

El nuevo modelo presentado en este trabajo se aplica solo para el diseño de zapatas combinadas en esquina. Las consideraciones de este trabajo son: el miembro estructural es rígido y el suelo que soporta a la zapata es elástico y homogéneo, que cumplen con la ecuación de la flexión biaxial, es decir, la presión varía linealmente.

El nuevo modelo presentado en este documento concluye lo siguiente:

- 1.- El espesor para las zapatas combinadas de esquina se rige por el cortante por flexión, y las zapatas aisladas se rigen por el cortante por penetración.
- 2.- El nuevo modelo no está limitado, mientras que el diseño actual considera que la presión máxima en todos los puntos de contacto, es decir, la fuerza resultante de las cargas aplicadas coincide con la posición del centro geométrico de la zapata.
- 3.- El nuevo modelo se ajusta más a condiciones reales con respecto al diseño actual, porque el nuevo modelo toma en cuenta la presión lineal del suelo y el diseño actual considera la presión uniforme en toda la superficie de contacto y esta es la presión máxima.
- 4.- El nuevo modelo para el diseño de zapatas combinadas en esquina sujetas a carga axial y dos momentos en direcciones ortogonales debido a cada columna considera dos líneas de propiedad restringidas, pero puede ser aplicado a tres líneas de propiedad.

El nuevo modelo que se muestra en este trabajo en términos de las cargas aplicadas debido a cada columna se puede aplicar a: 1) Carga sin momentos, 2) Carga y un momento (flexión uniaxial), 3) Carga y dos momentos ortogonales (flexión biaxial).

Por lo tanto, el modelo propuesto es el más apropiado, ya que genera un mejor control de calidad en los recursos utilizados.

Las siguientes investigaciones pueden ser: 1) Una continuación de este trabajo sería formular el costo mínimo para las zapatas combinadas de esquina; 2) Cuando las zapatas combinadas de esquina soporten más de dos columnas en cada dirección; 3) El modelo propuesto se puede ampliar para diseño de losas de cimentaciones; 4) Cuando se desplante la zapata sobre otro tipo de suelo, por ejemplo en suelos totalmente arcillosos (suelos cohesivos) o en suelos totalmente arenosos (suelos granulares), el diagrama de presión es diferente al lineal y el diagrama podría ser parabólico (ver Figura 1).

6. REFERENCES

- Abdrabbo, F., Mahmoud, Z. I. and Ebrahim, M. (2016), *Structural design of isolated column footings*. Alexandria Engineering Journal. 55(3):2665-2678. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.016>
- ACI 318S-14 (2014), “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Committee 318”, New York, USA.
- Anil, Ö, Akbaş, S.O., Babagİray, S., Gel, A.C. and Durucan, C. (2017), *Experimental and finite element analyses of footings of varying shapes on sand*. Geomechanics and Engineering. 12(2):223-238. <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.2.223>
- Aydogdu, I. (2016), *New Iterative method to Calculate Base Stress of Footings under Biaxial Bending*. International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS). 8(4):40-48. <https://doi.org/10.24107/ijeas.281460>
- Balachandar, S. and Narendra Prasad, D. (2017), *Analysis and Design of Various Types of Isolated Footings*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 6(3):3980-3986. http://www.ijirset.com/upload/2017/march/173_balachandar%20pmu.pdf
- Bowles, J. E. (2001), “*Foundation analysis and design*”. McGraw-Hill, New York, USA.
- Chen, W-R., Chen, C-S and Yu, S-Y. (2011), *Nonlinear vibration of hybrid composite plates on elastic foundations*. Structural Engineering & Mechanics. 37(4):367-383. <https://doi.org/10.12989/sem.2011.37.4.367>
- Das, B.M., Sordo-Zabay, E., Arrijoja-Juarez, R. (2006), “*Principios de ingeniería de cimentaciones*”, Cengage Learning Latín América, Distrito Federal, México.
- Dezhkam, B. and Yaghfoori, A. (2018), *Soil foundation effect on the vibration response of concrete foundations using mathematical model*. Computers and Concrete. 22(2):221-225. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.22.2.221>
- El-kady, M. S. and Badrawi, E. F. (2017), *Performance of isolated and folded footings*. Journal of Computational Design and Engineering. 4:150-157. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2016.09.001>
- Sawwaf, M. and Nazir, A. K. (2010), *Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand*. Alexandria Engineering Journal. 49:349-356. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2010.07.002>
- Fillo, L., Augustin, T. and Knapcová, V. (2016), *Influence of footings stiffness on punching resistance*. Perspectives in Science. 7:204-207. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.034>
- Ibrahim, A., Dif, A. and Othman, W. (2018), *Nonlinearity analysis in studying shallow grid foundation*. Alexandria Engineering Journal. 57:859-866. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.021>
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., El-Shafie, A. and Eslami, M. (2011), *Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall*. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 12(6):415-427. <https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A1000252>
- Kurian, N. P. (2005), “*Design of foundation systems*”, Alpha Science Int'l Ltd., New Delhi, India.
- López-Chavarría, S., Luévanos Rojas, A. and Medina Elizondo, M. (2017), *Optimal dimensioning for the corner combined footings*. Advances in Computational Design. 2(2):169-183. <https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.2.169>
- Luévanos-Rojas, A., Faudoa-Herrera, J. G., Andrade-Vallejo, R. A. and Cano-Alvarez M. A. (2013), *Design of Isolated Footings of Rectangular Form Using a New Model*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 9(10):4001-4022. <http://www.ijcic.org/ijcic-12-10031.pdf>

- Luévanos-Rojas, A. (2014a), *Design of isolated footings of circular form using a new model*. Structural Engineering and Mechanics. 52(4):767-786. <https://doi.org/10.12989/sem.2014.52.4.767>
- Luévanos-Rojas, A. (2014b), *Design of boundary combined footings of rectangular shape using a new model*. Dyna-Colombia. 81(188):199-208. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n188.41800>
- Luévanos-Rojas, A. (2015), *Design of boundary combined footings of trapezoidal form using a new model*. Structural Engineering and Mechanics. 56(5):745-765. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.56.5.745>
- Luévanos-Rojas, A. (2016a), *A comparative study for the design of rectangular and circular isolated footings using new models*. Dyna-Colombia. 83(196):149-158. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n196.51056>
- Luévanos-Rojas, A. (2016b), *A new model for the design of rectangular combined boundary footings with two restricted opposite sides*. Revista ALCONPAT. 6(2):172-187. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i2.137>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2017a), *Optimal design for rectangular isolated footings using the real soil pressure*. Ingeniería e Investigación. 37(2):25-33. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v37n2.61447>
- Luévanos-Rojas, A., Barquero-Cabrero, J. D., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2017b), *A comparative study for design of boundary combined footings of trapezoidal and rectangular forms using new models*. Coupled Systems Mechanics. 6(4):417-437. <https://doi.org/10.12989/csm.2017.6.4.417>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. & Medina-Elizondo, M. (2018), *A new model for T-shaped combined footings Part II: Mathematical model for design*. Geomechanics and Engineering. 14(1):61-69. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.061>
- Magade, S. B. and Ingle, R. K. (2019), *Numerical method for analysis and design of isolated square footing under concentric loading*. International Journal of Advanced Structural Engineering. 11:9-20. <https://doi.org/10.1007/s40091-018-0211-3>
- Punmia, B. C., Kumar-Jain, A., Kumar-Jain, A. (2007), “*Limit state design of reinforced concrete*”, Laxmi Publications (P) Limited, New Delhi, India.
- Santos, D. F. A., Lima Neto, A. F. and Ferreira, M. P. (2018), *Punching shear resistance of reinforced concrete footings: evaluation of design codes*. IBRACON Structures and Materials Journal. 11(2):432-454. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000200011>
- Shahin M. A. and Cheung E. M. (2011), *Stochastic design charts for bearing capacity of strip footings*. Geomechanics and Engineering. 3(2):153-167. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/6498>
- Tahmasebi poor, A., Barari, M., Behnia, M. and Najafi, T. (2015), *Determination of the ultimate limit states of shallow foundations using gene expression programming (GEP) approach*. Soils and Foundations. 55(3):650-659. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.015>
- Varghese, P. C. (2009), “*Design of reinforced concrete foundations*”, PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, India.
- Yáñez-Palafox, J.A., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2019), *Modeling for the strap combined footings Part II: Mathematical model for design*. Steel and Composite Structures. 30(2):109-121. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.2.109>

Control del hormigón de refuerzo de encepados de cimentación sobre pilotes metálicos – Estudio de caso

R. Boni^{1*}, P. Helene² 

* Autor de Contacto: ricardo.boni@concretophd.com.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.467>

Recepción: 15/05/2020 | Aceptación: 11/08/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio de caso sobre los desafíos, el ingenio y las buenas prácticas de construcción involucradas en la ejecución de refuerzos estructurales de encepados de fundación de hormigón armado sobre pilotes metálicos. Los refuerzos estructurales en cuestión se llevaron a cabo en un proyecto con 3 edificios residenciales de aproximadamente 30 pisos cada uno, ubicados cerca del paseo marítimo. Como resultado, se observó que un estudio previo de dosificación para definir el tipo y las características del hormigón a ser utilizado, la ejecución de un hormigonado prototipo, las particularidades del sitio de construcción, la definición previa de los procedimientos de ejecución empleados, así como el monitoreo y el control sistemático de los hormigonados y otros procedimientos de construcción fueron factores determinantes para promover la seguridad y la calidad de los servicios de refuerzo de acuerdo con las premisas de diseño.

Palabras clave: refuerzo estructural; encepados de fundación; hormigón.

Citar como: Boni, R., Helene, P. (2020), " *Control del hormigón de refuerzo de encepados de fundación sobre pilotes metálicos – Estudio de caso*", Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 336 – 349, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.467>

¹ PhD Engenharia, São Paulo, Brasil.

² Professor Titular da Escola Politécnica da USP, PhD Engenharia, São Paulo, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor R. Boni contribuyó a la recopilación de datos, imágenes y redacción del texto, el autor P. Helene contribuyó con la orientación y revisión final del texto. Ambos autores fueron responsables de la idea original, desarrollo y estructuración del artículo.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Control of reinforcement concrete in pile caps over steel piles – Case study

ABSTRACT

This paper presents a case study about the challenges and good building practices involved in the execution of structural reinforced concrete pile caps over steel piles. The structural reinforcements were carried out in a project with 3 residential towers of approximately 30 floors each, located on the seafront. As a result, it was observed that mix design to define the type and characteristics of concrete, prototype event, particularities of the construction site, executive procedures employed, as well as the systematic monitoring and control of concreting events and other constructive stages were determining factors to promote the safety and quality of reinforcement services in accordance with the assumptions and design requirements.

Keywords: structural reinforcement; pile caps; concrete.

Controle do concreto de reforço de blocos de fundação sobre estacas metálicas – Estudo de caso

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo de caso sobre os desafios, as engenhosidades e as boas práticas de construção envolvidas na execução de reforços estruturais de blocos de fundação de concreto armado sobre estacas metálicas. Os reforços estruturais em questão foram realizados em um empreendimento com 3 torres residenciais de aproximadamente 30 pavimentos tipo cada, localizado próximo da orla marítima. Como resultado, observou-se que um estudo prévio de dosagem para definição do tipo e características do concreto a ser utilizado, execução de evento protótipo de concretagem, particularidades do canteiro de obras, definição prévia dos procedimentos executivos empregados, bem como o acompanhamento e o controle sistemático dos eventos de concretagem e das demais etapas construtivas foram fatores determinantes para promover a segurança e a qualidade dos serviços de reforço em conformidade com as premissas de projeto.

Palavras-chave: reforço estrutural; blocos de fundação; concreto.

Información Legal

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

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

Localizada en un terreno con más de 7,000 m², aproximadamente a 250 m de la orilla marítima de la ciudad de Vitória, ES, Brasil. El desarrollo está compuesto por 3 torres residenciales con un total de 166 unidades. La *Torre 1* posee 33 pisos y las *Torres 2 y 3* tienen 31 pisos cada una.

El complejo residencial, cuya construcción fue concluida a finales del año de 2010, aún posee dos pisos de estacionamiento, bajo la proyección de las torres y del área de uso común, ambos localizados sobre el nivel del agua, es decir sin necesidad de usar de piso de sub-presión. El refuerzo estructural de los encepados de fundación de las torres residenciales del desarrollo fue realizado en el primer semestre del año 2018, entre los meses de enero y mayo, en virtud de no conformidades observadas en la estructura del desarrollo, verificadas por ocurrencia del colapso parcial en el área de recreación del desarrollo.

Este artículo presenta los estudios, los ensayos, el ingenio, las buenas prácticas de ingeniería, los procedimientos usados en la ejecución de esos refuerzos y las actividades desarrolladas, con énfasis en el control de calidad del concreto.

2. DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO DE REFUERZO Y EL RASTRO DEL CONCRETO

El proyecto de refuerzo estructural de los encepados de cimentación de las torres residenciales fue elaborado según las recomendaciones de la norma ABNT NBR 6118:2014. Este proyecto contempla el refuerzo de 20 elementos estructurales, según lo destacado en las Figuras 1 y 2, que presentan los refuerzos estructurales ejecutados en planta y en perspectiva (destacados en rojo), respectivamente.

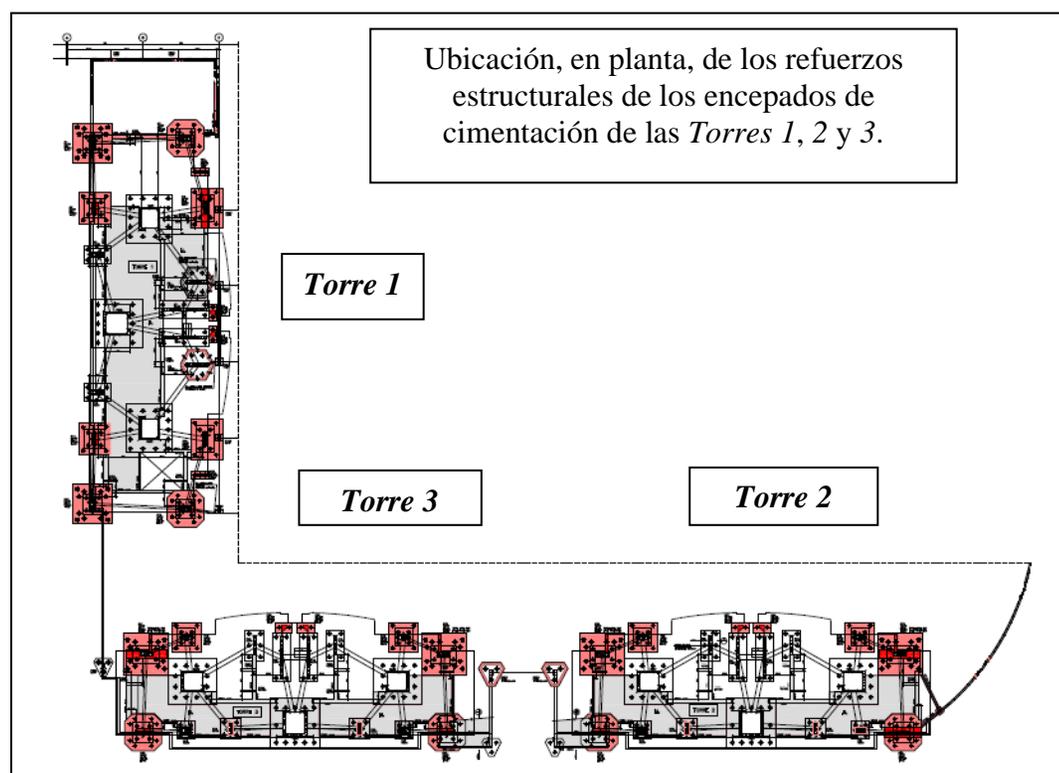


Figura 1. Detalle en planta, de la ubicación de los refuerzos estructurales de los encepados de cimentación de las torres residenciales.

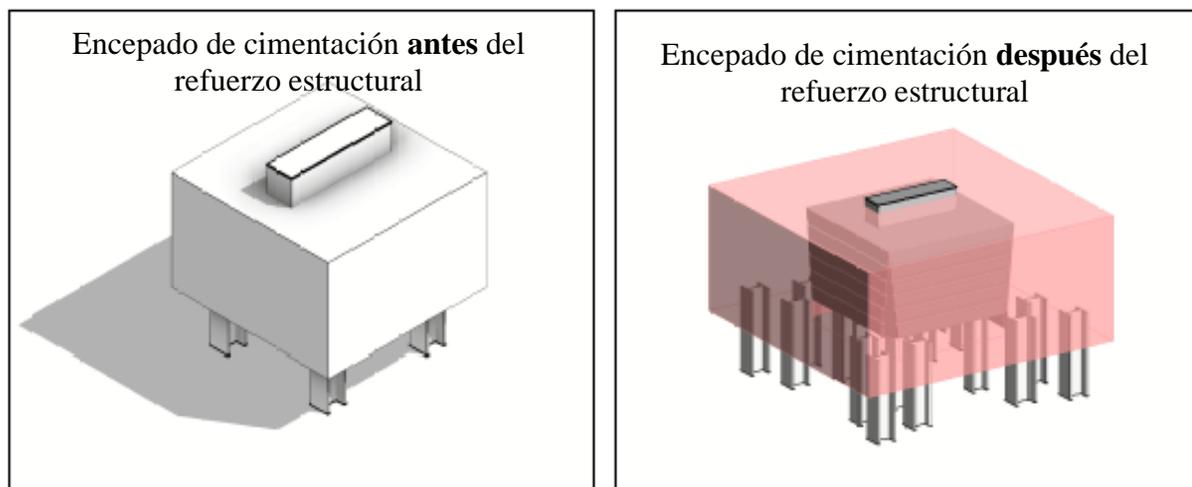


Figura 2. Detalle genérico en perspectiva (antes y después) del refuerzo estructural de los encepados de cimentación.

En la figura 2, se nota que fueron clavadas estacas metálicas adicionales en la periferia de los encepados existentes. En total fueron clavados 152 pilotes tipo perfiles W200x86 y W250x115, con carga de trabajo de 194tf y 258tf, respectivamente. El largo de ejecución varía de 20 a 22 metros de profundidad. El proyecto de refuerzo de la cimentación fue elaborado teniendo como base las prescripciones de la norma ABNT NBR 6122:2010.

La resistencia a la compresión del concreto especificado para el refuerzo de los elementos fue de $f_{ck} \geq 40\text{MPa}$, módulo de elasticidad $E_c \geq 32\text{GPa}$, para una tensión correspondiente a 14MPa (0,35 de f_{ck}), con relación a/c máxima de 0,50. Esa especificación atiende a la clase de agresividad ambiental fuerte (CAA III) requerida en el proyecto, según sub ítems 6.4 “Agresividad del ambiente” y 7.4 “Calidad del concreto de recubrimiento” de la norma ABNT NBR 6118:2014.

De esa forma, basado en las premisas de proyecto, disponibilidad de insumos en la región, necesidades y particularidades de la obra fue desarrollado un estudio de dosificación. Para el estudio fueron utilizadas las normas ABNT NBR 12655:2015 y ABNT NBR 15823:2017 Partes 1 a 6 relativas al concreto autocompactante. Además de esas normas, también sirvió como referencia a las directrices del método IBRACON (Tutikian, B.; Helene, P., 2011) para desarrollo de un concreto autocompactante, con tipo de dispersión *SFII*, lo cual está presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de concreto autocompactante, en materiales secos, $f_{ck} \geq 40\text{MPa}$ a los 28 días de edad para 1m^3 de concreto.

Dosificación de concreto autocompactante, clase de dispersión <i>SFII</i>	Concebido para f_{ck} 40MPa
consumo de cemento por m^3 (CP III-40-RS)	425kg
relación agua/(cemento+adición)	0,43
agua	183kg
arena fina	329kg
arena mediana	494kg
pedra 0	960kg
aditivo polifuncional	2,5kg
aditivo superplastificante ¹	1,5kg

(1) Adicionado totalmente en la planta de concreto. Solamente para el caso de eventuales correcciones de dispersión, se permitió el uso adicional de ese aditivo en obra, en pequeñas cantidades, a depender de la necesidad.

El aspecto visual del concreto en cuestión puede ser observado en las Figuras 3, 4 y 5, que evidencian los ensayos de dispersión, habilidad pasante anillo J y habilidad pasante caja L, realizados de acuerdo con las normas ABNT NBR 15823-2:2017, ABNT NBR 15823-3:2017 y ABNT NBR 15823-4:2017, respectivamente. Además, en la Figura 3, también es posible observar el índice de estabilidad visual (IEV) del concreto que fué desarrollado especialmente para el refuerzo estructural de los encepados de cimentación de este desarrollo.



Figura 3. Detalle del ensayo de dispersión realizado en laboratorio durante el estudio de dosificación.



Figura 4. Detalle del ensayo de habilidad pasante a través de la caja L, realizado en el laboratorio durante el estudio de dosificación.



Figura 5. Detalle del ensayo de habilidad pasante a través del anillo J, realizado en laboratorio durante el estudio de dosificación.

Buscando minimizar posibles no conformidades relacionadas con la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto, fue previamente acordado entre los involucrados que durante los eventos de vaciado de refuerzo estructural no sería adicionada agua al camión de concreto luego de dejar la empresa premezcladora (donde la cantidad de agua de amasado es debidamente controlada por hidrómetros).

Siendo así, en obra, luego de la realización de los ensayos de aceptación (dispersión medido por *slump flow test*), en caso de que hubiera la necesidad de corrección de la dispersión del concreto, eso sería procedido solamente por medio del aditivo, mediante acompañamiento técnico del consultor.

Sin embargo, antes del vaciado de los refuerzos de los encepados de cimentación fue realizado un evento prototipo (simulación en hormigonera) buscando evaluar el comportamiento del concreto estudiado en laboratorio en las condiciones de campo. Se observó que el tiempo de transporte del concreto desde la premezcladora hasta la obra era de aproximadamente 25 minutos, distancia de 9,6 km y que el tiempo de colocación del concreto era de máximo, 30 minutos, por camión.

En la oportunidad del evento de vaciado del prototipo también fueron vaciados probetas cilíndricas para ensayos de resistencia a la compresión a los 3, 7, 14, 28 y 45 días de edad y módulo de elasticidad a los 28 días, según lo evidenciado en la Figura 6.



Figura 6. Detalle de los moldes de probetas cilíndricas en el vaciado del prototipo para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

Basado en los resultados favorables de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad obtenidas en el estudio de dosificación realizado en laboratorio y del prototipo mencionado, se inició el vaciado del refuerzo estructural de los encepados según etapas detalladas posteriormente, en *Procedimientos Ejecutivos*.

3. PROCEDIMIENTOS EJECUTIVOS

Los procedimientos ejecutivos adoptados en este estudio de caso están basados en las normas brasileñas vigentes, principalmente la norma ABNT NBR 14931:2004 y en las buenas prácticas de ingeniería.

Los trabajos iniciaron con la colocación de pilotes metálicos en regiones localizadas en el entorno de los encepados de cimentación que serán reforzados, como se presenta en la perspectiva de la Figura 2. Esos pilotes tienen una profundidad que varía de 20 a 22 m y fueron clavadas por perforador de pilotes, adaptados, ubicados entre las losas, como se muestra en la Figura 7.

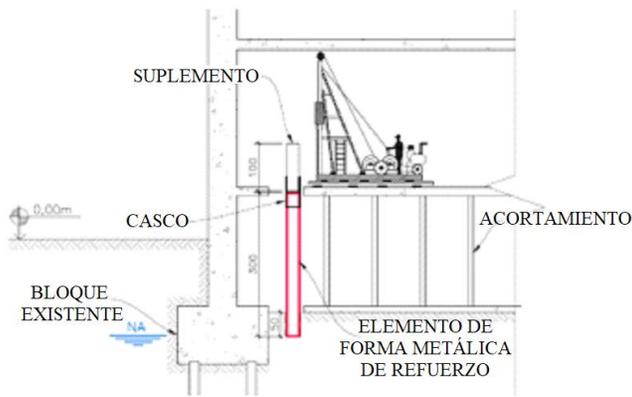


Figura 7. Detalle del martinete adaptado posicionado entre losas para realizar los servicios de hincado de pilotes de refuerzo estructural.

Debido a la dificultad de acceso, las dimensiones del equipo de conducción y la interferencia existente en el sitio, para la ejecución de este paso de refuerzo fueron necesarios algunos servicios adicionales, entre ellos:

- ✓ apuntalar previamente la losa del pavimento de planta baja, donde los equipos de conducción quedaran apoyados;
- ✓ adaptar todos los equipos de hincado, en virtud de la altura de la torre del perforador de pilote ser mayor que la distancia entre losas (pie derecho);
- ✓ ejecutar demoliciones localizadas y agujeros en la losa de la planta baja para permitir la conducción de pilotes de metal;
- ✓ segmentar previamente los pilotes metálicos (de largo variable de 2 a 4 m) para permitir el posicionamiento por sondeo de los perfiles en el local de conducción;
- ✓ utilizar un suplemento (sobre el casco de protección de la cabeza del pilote) de forma de auxiliar el hincado de los perfiles.

De esa forma los segmentos metálicos de los pilotes son hincados e inmediatamente soldados a los segmentos posteriores, en la medida del avance de los trabajos. La Figura 8 ilustra la ejecución de los trabajos y los pilotes hincados en el perímetro de uno de los encepados de cimentación. En este último caso, para mejorar la visualización, el registro de la imagen hecha posteriormente a la excavación del entorno del bloque.



Figura 8. Detalle de la ejecución de los trabajos de conducción (a la izquierda) y de los pilotes metálicos clavados en el entorno del bloque de cimentación a ser reforzado (a la derecha).

Luego del hincado de todos los pilotes de un determinado encepado de cimentación, fue realizada la excavación. Para ello fue instalado un sistema con bombas de achicamiento del nivel de agua localizado en la región alrededor del bloque o encepado (este sistema sería desactivado solamente después del vaciado y relleno). La excavación fue realizada con equipo de pequeño porte y en la mayoría de los casos, manualmente, en virtud de interferencias y de las condiciones de difícil acceso.

Posteriormente fue ejecutado el lastre de concreto con 5 cm de espesor, medidas las dimensiones de los encepados existentes y verificadas, por medio de la topografía, posibles excentricidades de los pilotes existentes (en carga), como lo evidenciado en la Figura 9.



Figura 9. Detalle de la medición de las dimensiones de los encepados existentes y de los pilotes metálicos, después de la excavación y ejecución del concreto.

Concluida esa etapa, se iniciaron los trabajos de corte de los pilotes, cuyo tope debería quedar 35 cm por encima de la cota inferior del bloque de refuerzo, y la preparación de las superficies laterales de los encepados de cimentación, conforme se presenta en la Figura 10. En esta etapa, se realizaron chaflanes y ranuras en los bordes y superficies laterales de los bloques, más allá del reconocimiento de todas las caras, excepto la inferior, según requerimientos de diseño estructural.



Figura 10. Detalle de la ejecución de los chaflanes y surcos en las aristas y superficies laterales de los encepados de fundación.

La ejecución de los chaflanes y surcos en las laterales de los encepados existentes eran imprescindibles y muy importantes, una vez que buscaban garantizar la calidad de la junta de

vaciado en la interface concreto viejo/concreto nuevo (a ser lanzado) y de colaborar en la transmisión de los esfuerzos. La ejecución de los chaflanes en las aristas laterales proporcionó una geometría tipo cono que dispuso la verificación de la adherencia entre el bloque existente y el refuerzo estructural.

Se registró que los surcos fueron ejecutados con 3 cm de profundidad a lo largo de toda la superficie lateral y de los chaflanes de las aristas laterales con dimensiones variando de 0 cm (en la cara superior) a 15 cm (en la cara inferior del bloque), como lo evidenciado en la Figura 11.

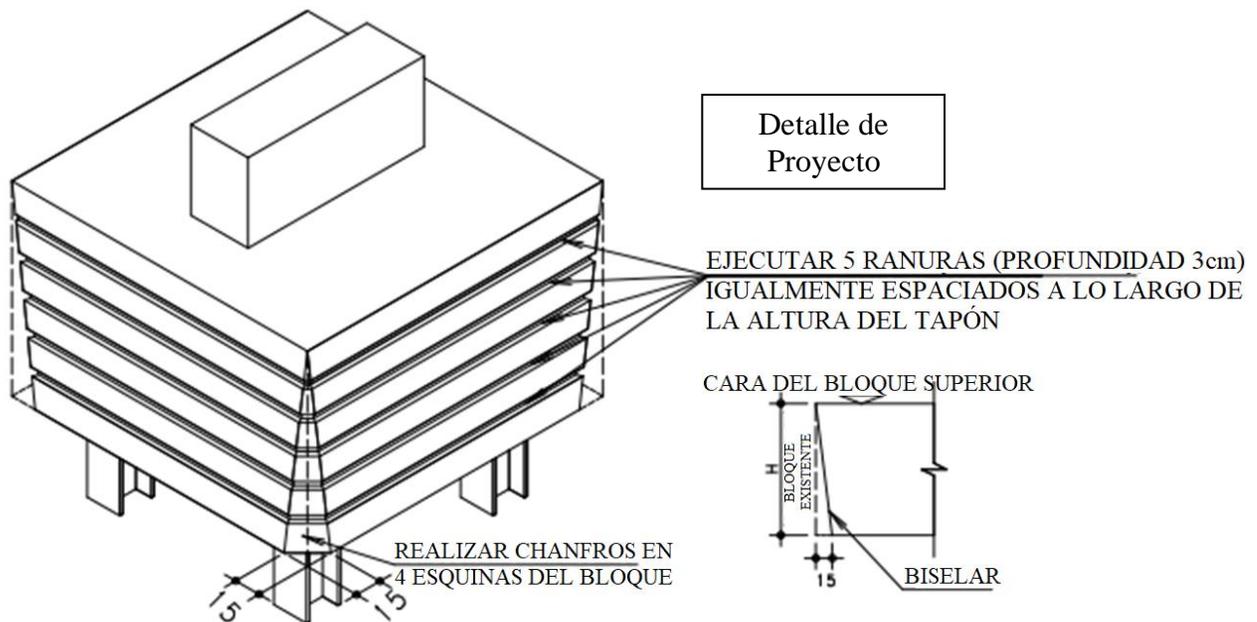


Figura 11. Detalle de proyecto indicando ubicación de los surcos y de los chaflanes.

La figura 12 evidencia el bloque de cimentación después de la culminación de los trabajos de tratamiento de la superficie del concreto.

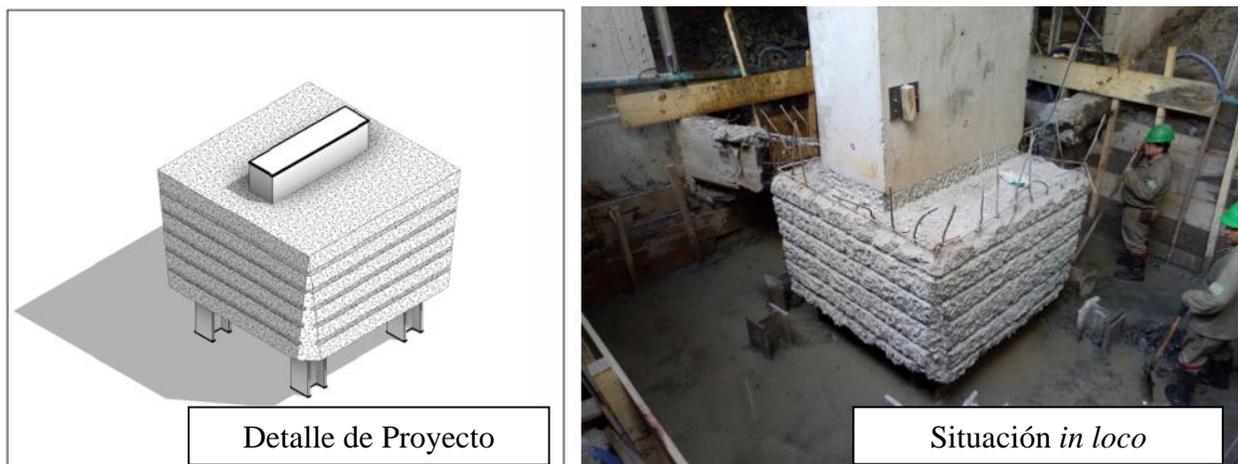


Figura 12. Detalle del tratamiento de la superficie del bloque de cimentación. Detalle de proyecto (a la izquierda) y de la situación *in loco* (a la derecha).

Después de la preparación de la superficie, iniciaron los trabajos de armado del refuerzo estructural ejecutado por una empresa especializada y mano de obra certificada, mediante acompañamiento y verificación minuciosa de los trabajos, en lo que se refiere a la ubicación, mediciones, cantidad de

barras y demás etapas que involucran el control de calidad, inclusive el uso de separadores tipo multi apoyo en las laterales y en el fondo del bloque, de forma de garantizar el recubrimiento especificado en proyecto (40 mm).

Se registró que las barras de acero utilizadas en el refuerzo estructural de los encepados (mediciones 25 mm, 20 mm, 16 mm y 12,5 mm) fueron entregadas en obra cortadas/dobladas y debidamente identificadas. La Figura 13 presenta la ejecución de los trabajos de armado de refuerzo de los encepados.



Figura 13. Detalle de la ejecución de los trabajos de armado de refuerzo del bloque de fundación.

Después de revisar el armado y liberado por parte del equipo de ingeniería, empezó el montaje de las formaletas de madera y de apoyo, como se presenta en la Figura 14. Todos esos trabajos también eran supervisados en cuanto al nivel, plomada, dimensiones, cierre y estanqueidad.



Figura 14. Detalle de las formas del refuerzo estructural de los encepados de fundación.

Finalizando los trabajos de refuerzo estructural, fue realizado el vaciado del refuerzo del elemento estructural por medio del uso de concreto autocompactante, bombeado, según la dosificación detallada en el ítem 2 “*Datos básicos del proyecto de refuerzo y el rastro del concreto*” de este artículo. La Figura 15 evidencia el aspecto visual del concreto observado en campo.



Figura 15. Aspecto visual del concreto auto compactante utilizado en el refuerzo de los encepados estructurales.

En esta etapa era imprescindible que el concreto fuese proyectado a baja velocidad para evitar la acumulación de aire en la superficie inferior del bloque evitando, de esa manera, posibles fallas de vaciado ocultas. Para evitar las no conformidades de esa naturaleza, el concreto de la porción inferior del bloque era proyectado lentamente, en apenas uno de los lados del bloque, y vibrado moderadamente con vibradores de inmersión con aguja de diámetro igual a 40 mm.

Es importante registrar que la superficie tratada del bloque existente, en la región de la interface del concreto viejo y nuevo, fue previamente limpiada con agua a presión, de manera de remover todo el polvo, material pulverulento o cualquier otro tipo de contaminante. El concreto autocompactante fue proyectado sobre la superficie limpia en la condición saturada seca.

La Figura 16 evidencia el evento de vaciado del refuerzo de uno de los bloques de cimentación, realizado con concreto autocompactante, respetando las premisas mencionadas en el párrafo anterior.



Figura 16. Detalle del vaciado del refuerzo del bloque de fundación, realizado con concreto autocompactante.

Sobre la recepción del concreto en obra, fueron realizados a todos los camiones hormigonera, por laboratorio especializado, ensayos de dispersión (*slump flow test*) conforme recomendaciones de la norma ABNT NBR 15823-2:2017. En esos casos fueron observados y analizados, como criterio de aceptación del concreto en estado fresco, la clase de dispersión, o índice de estabilidad visual obtenidos, bien como aspecto visual del concreto, que debería presentarse cohesivo, sin exudación

o segregación aparente. Conforme lo registrado anteriormente, en caso de necesidad de corrección de la dispersión era utilizado apenas aditivo superplastificante, en ninguna hipótesis la dispersión fue corregida mediante adición de agua en obra.

Además de los ensayos de recepción mencionados anteriormente, siempre que fue posible, fueron realizadas visitas técnicas a la central dosificadora de concreto, con la intención de acompañar los procedimientos de producción de concreto, en lo que se refiere al control de los insumos, los ensayos de determinación del contenido de humedad de los agregados finos, dosificación, mezcla y demás etapas.

Con la finalidad de minimizar el riesgo de fisura, después del vaciado, las formaletas laterales fueron mantenidas por un período de 3 días con intención de evitar la evaporación superficial del agua. Además de eso, la cara superior del bloque fue mantenida siempre húmeda, por medio de aspersión de agua potable, de manera de garantizar las condiciones ideales de curado.

Posteriormente, luego de la retirada de las formaletas, fueron realizadas inspecciones minuciosas en todas las superficies del refuerzo ejecutado y en las regiones de la interface concreto nuevo/concreto viejo. Se registró que no fue encontrados ningún tipo de no conformidad relacionadas con fallas de vaciado, fisuras etc.

La Figura 17 presenta el aspecto visual y el acabado superficial del concreto en estado endurecido aplicado en el refuerzo de los encepados de cimentación.



Figura 17. Detalle del aspecto visual y del acabado superficial del concreto de los encepados de cimentación reforzados.

Luego, después de la inspección los encepados eran liberados para ser cubiertos. Para ello fue utilizado un compactador mecánico.

Con respecto al control tecnológico del concreto fueron vaciados 6 probetas por camión hormigonera, para la ejecución de ensayos de resistencia a la compresión a edades de 7, 28 y 45 días (2 por edad), utilizando el criterio de muestra total, conforme ítem 6.2.3.1 “Control del concreto por muestra total (100%)” de la norma ABNT NBR 12655:2015.

Las probetas eran vaciadas, almacenadas y transportadas de acuerdo con las exigencias de la norma ABNT NBR 5738:2015. Se resalta que las probetas vaciadas a los 45 días de edad solo serían ensayadas en caso de la identificación de no conformidades relacionadas con la resistencia a la compresión a los 28 días. Los resultados obtenidos serán detallados más adelante.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Considerando los procedimientos ejecutivos descritos anteriormente y las buenas prácticas de ingeniería adoptadas, se presentan los resultados obtenidos, en lo que se refiere a la integridad y la calidad del concreto usado.

Después del vaciado y realización de las inspecciones visuales en todos los refuerzos de los encepados de cimentación, se constató que estos no presentaron fisuras consecuencia del fenómeno de retracción o cualquier otro tipo de falla de vaciado relevante que pudiera comprometer su integridad, su durabilidad y la vida útil de la estructura.

En lo que se refiere al control tecnológico del concreto aplicado en el refuerzo estructural de los encepados de las torres residenciales, la Figura 18 presenta gráficamente los resultados de resistencia a la compresión del concreto a los 7 y 28 días de edad de los 66 camiones hormigonera (muestra a 100%), en la forma de carta de valores individuales.

Como se puede observar, la resistencia promedio obtenida, fue de 45,2 MPa, desviación estándar de 2,9 MPa, coeficiente de variación igual a 6,4% y con valores extremos variando de 40,7 MPa (mínimo) a 53,9 MPa (máximo). Considerando la resistencia especificada en proyecto, se registra que todos resultados están conformes.

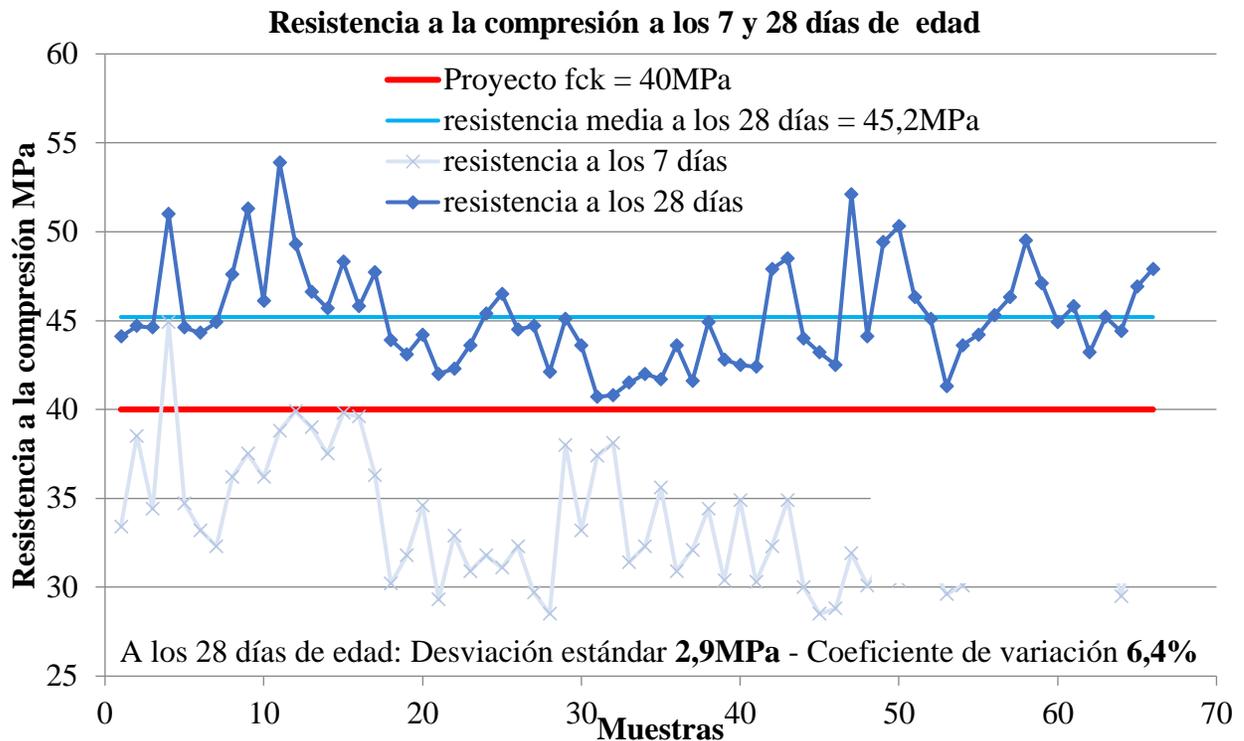


Figura 18. Carta de valores individuales concreto $f_{ck} = 40\text{MPa}$, autocompactante utilizado en el refuerzo estructural de los encepados de cimentación.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Este artículo buscó resaltar que simples recomendaciones coherentes con la norma vigente y buenas prácticas constructivas, estudios previos, así como el control y acompañamiento técnico sistemático de las actividades antes y durante los eventos de vaciado, fueron suficientes para promover un elemento estructural íntegro y un resultado final satisfactorio en conformidad con las exigencias del proyecto.

6. AGRADECIMIENTOS

Se registra agradecimiento especial a los profesionales de las empresas responsables por la elaboración del proyecto de fundación Geoconsult, por el proyecto estructural de refuerzo França & Asociados, por la construcción Cyrela y por el proveedor del concreto Concrevit, que juntos con la consultoría de PhD Ingeniería hicieron posible esta realización con calidad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 15823-1: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 15823-2: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 15823-3: Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 15823-4: Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U*. Rio de Janeiro.
- Helene, P., Terzian, P. (1993), “*Manual de dosagem e controle do concreto*”. PINI/SENAI, São Paulo, Brasil, p. 349.
- Tutikian, B., Helene, P. (2011), “*Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*” In. Geraldo C. Isaia (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 1, p. 415-451.

Análisis de la variabilidad horaria para la detección de daños en pavimentos flexibles usando termografía infrarroja

M. Pacara-Copa^{1*} , J. H. A. Rocha² , J. S. Ledezma-Pérez¹ 

*Autor de Contacto: marinapacara@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.468>

Recepción: 22/03/2020 | Aceptación: 05/08/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

En este trabajo se discute el rango horario para optimizar e interpretar los resultados de la termografía infrarroja cuando es utilizada en la detección de daños en pavimentos flexibles. Se realizó un seguimiento de 14 horas continuas (5:00 a.m. a 7:00 p.m.) para cuatro zonas de estudio en una avenida céntrica de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. El seguimiento evidenció un rango horario óptimo para la toma de imágenes termográficas de 11:00 a.m. hasta las 4:00 p.m.; también se constató la visualización del deterioro mediante la colorimetría diferenciada en los termogramas a diferentes horas. Este ensayo permite localizar las áreas en las que se puede efectuar una inspección detallada. Como limitante se tiene su sensibilidad a cambios en las condiciones ambientales.

Palabras clave: termografía infrarroja; pavimento flexible; inspección.

Citar como: Pacara-Copa, M., Rocha, J. H. A., Ledezma-Pérez, J. S. (2020), “Análisis de la variabilidad horaria para la detección de daños en pavimentos flexibles usando termografía infrarroja”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 350 – 363, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.468>

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

Contribución de cada autor

En este trabajo la autora M. Pacara-Copa contribuyó con la idea original, trabajo de campo y monitoreo, recolección de datos, elección y desarrollo de la metodología de trabajo, escritura del trabajo y discusión de resultados; el autor J. H. A. Rocha contribuyó con la elección y desarrollo de la metodología de trabajo, recolección de datos, discusión de resultados y revisión de la escritura de trabajo, y la autora J. S. Ledezma P. contribuyó con la discusión de resultados y revisión de la escritura de trabajo.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Time variability analysis for damage detection in flexible pavement using infrared thermography

ABSTRACT

This document discusses the time range to optimize and understand infrared thermography results when used on damage detection for flexible pavement. A monitoring activity was performed during 14 continuous hours (5:00 a.m. to 7:00 p.m.) for four study areas in a centrally located avenue in Cochabamba City, Bolivia. This activity evidenced an effective time range to take thermographic images from 11:00 a.m. to 4:00 p.m. Damage visualization by differential colorimetry in thermograms at different times was also verified. This test enables locating areas where a detailed inspection may be performed. As a limitation, its sensibility to changes under environmental conditions is evident.

Keywords: infrared thermography; flexible pavement; inspection.

Análise do melhor horário para a detecção de danos em pavimentos flexíveis usando termografia infravermelha

RESUMO

Este trabalho discute o intervalo de tempo para otimizar e interpretar os resultados da termografia infravermelha quando é usada para detectar danos em pavimentos flexíveis. Um acompanhamento de 14 h contínuas (5h às 19h) foi realizado para quatro áreas de estudo em uma avenida central na cidade de Cochabamba, Bolívia. O acompanhamento mostrou um intervalo de tempo ideal para a obtenção de imagens termográficas a partir das 11h até às 16h. A visualização da deterioração também foi verificada pela colorimetria diferenciada nos termogramas em diferentes momentos. Este teste permite localizar áreas onde uma inspeção detalhada pode ser feita. Como limitação observa-se a sua sensibilidade às mudanças nas condições ambientais.

Palavras-chave: termografia infravermelha; pavimento flexível; inspeção.

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

Las obras de infraestructura vial son importantes para el desarrollo socioeconómico de un país, debido a que permiten la movilidad de personas y bienes (Vyas et al., 2019). Sin embargo, estas obras sufren daños (fisuras, deformación, desagregación, etc), por lo que son necesarias actividades de inspección, mantenimiento y rehabilitación para garantizar su vida útil y brindar condiciones óptimas de servicio (Solla et al., 2014).

En Bolivia, la historia del mantenimiento y conservación de carreteras se inició con la creación del Servicio Cooperativo Boliviano Americano de Caminos (SCBAC), fundado en 1955 (Lovera, 2017). Posteriormente, en 1961 se crea el Servicio Nacional de Caminos (SNC), entidad encargada de la administración y mantenimiento de carreteras. En el 2006 se establece la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) mediante la Ley 3507 (Bolivia, 2006a), cuya misión institucional es la integración nacional mediante la planificación y la gestión de la Red Vial Fundamental (RFV) (Bolivia, 2006b). Las actividades de la ABC comprenden: planificación, administración, estudios y diseños, construcción, mantenimiento, conservación y operación de la RVF y sus accesos (ABC, 2011).

A pesar de la existencia de normativas e instituciones encargadas de la conservación, en Bolivia un gran porcentaje de las vías presentan problemas visibles, mayormente en pavimento flexible (Los tiempos, 2016, 2019; Opinión, 2018). La atención oportuna para el mantenimiento y/o rehabilitación de las vías, sobrepasa la capacidad de las entidades encargadas, tales como la ABC. Esta situación se da por la falta de técnicas de inspección. Muchas vías principales, más que todo en las ciudades, no son inspeccionadas correctamente debido a la minimización en la interrupción del tráfico. Este último punto evita una correcta evaluación y diagnóstico del estado actual del pavimento flexible, de tal manera que las acciones tomadas para su rehabilitación son, en muchos casos, erróneas o improvisadas.

Existen algunos métodos reportados en la literatura para la inspección de infraestructura tanto en puentes como vías de pavimento rígido y flexible (Rehman et al., 2016; Janků et al., 2019; Dong et al., 2016). Siendo el georadar el método más utilizado (Khamzin et al., 2017; Fernandes and Pais, 2017; Tosti et al., 2018); no obstante, se requiere contacto directo con la infraestructura y corte de tráfico vehicular. Por tal motivo, se hace necesario emplear técnicas que permitan una inspección que no interrumpa el tráfico y que sea eficiente a distancia. En este sentido, surge la termografía infrarroja como una alternativa para este propósito. Esta técnica no precisa contacto directo con el objeto inspeccionado y puede ser realizada a diferentes distancias (Baggathiappan et al., 2013; Rocha et al., 2017).

Si bien existen estudios de inspección en pavimentos con termografía infrarroja (Garrido et al., 2018; Golrokh and Lu, 2019), la literatura relacionada a pavimentos flexibles es escasa (Solla et al., 2014; Lin et al., 2018; Vyas et al., 2019). Por tanto, todavía es necesario evaluar sus capacidades y limitaciones como método de inspección para pavimentos flexibles, sobretodo en campo, una vez que la información reportada es experimental y fue aplicada en diferentes lugares.

En este sentido, el presente trabajo tiene por objetivo discutir el rango horario para optimizar e interpretar los resultados de la termografía infrarroja cuando es utilizada en la detección de daños de pavimentos flexibles, considerando como caso de estudio dos tramos de la avenida San Martín de la ciudad de Cochabamba – Bolivia. El sector seleccionado se caracteriza por presentar un alto tráfico y congestión vehicular, además de presentar un pavimento flexible deteriorado (Los Tiempos, 2016).

2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La radiación térmica es el tipo de radiación electromagnética que compete a la transferencia de calor y es emitida como consecuencia de las transiciones de energía de moléculas, átomos y electrones. La intensidad de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo dependerá de la temperatura a la cual se encuentra la superficie, de esta manera, se considera que todo cuerpo cuya temperatura se encuentre por encima del cero absoluto (0 K) emite radiación infrarroja (Rocha et al., 2017).

La energía térmica irradiada por un objeto se expresará en función de la energía emitida por un radiador perfecto llamado cuerpo negro o ideal (Cengel, 2003).

El ojo humano puede ver la radiación en el espectro electromagnético entre 0.4 – 0.7 μm (espectro visible), la banda infrarroja va de 0.9 – 14 μm , siendo necesarios equipos para su detección. Las cámaras termográficas destinadas para inspección trabajan en la banda infrarroja. La relación entre la radiación electromagnética y la temperatura se explica a través de la ley de Stephan – Boltzmann, ecuación (1) (Baggathiappan et al., 2013).

$$W = \sigma * \epsilon * T^4 \quad (1)$$

Donde, W es la intensidad de la radiación (w/m^2), σ es la Constante de Stephan – Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 * \text{K}^4$), ϵ es la emisividad de la superficie y T es la temperatura medida (K).

3. PROCEDIMIENTO

Para lograr el objetivo del presente artículo se realizó un monitoreo del 20 al 27 de julio del 2020 durante 14 horas continuas. Las imágenes termográficas fueron tomadas cada hora, considerando como eje horario el medio día; es decir que se consideró 7 horas antes y 7 horas después. El rango horario de monitoreo fue de 5:00 a.m. a 7:00 p.m.

Se seleccionaron dos tramos de estudio: el primero ubicado en la avenida San Martin entre calle Jordán y Sucre, sobre la cual se encuentran frente a frente el Palacio de Justicia y el mercado 25 de mayo; y el segundo en la avenida San Martin entre avenida Heroínas y calle Colombia, en cuya recta se encuentran centros comerciales y ópticas.

Cada tramo de estudio se dividió en dos zonas para la toma de termogramas. En la Figura 1 se muestran las zonas donde fueron tomadas las imágenes termográficas: la Zona 1 se ubica en la avenida San Martin esquina Jordán acera Sudeste, de donde se obtienen imágenes panorámicas de toda la cuadra; la Zona 2 se localiza en la mitad del Tramo 1, avenida San Martin entre calle Jordán y Sucre acera Este; la Zona 3 se ubica en la intersección de la avenida San Martin y Heroínas sobre la jardinera central, y la Zona 4 se ubica en la mitad del Tramo 2, avenida San Martin entre avenida Heroínas y calle Colombia.

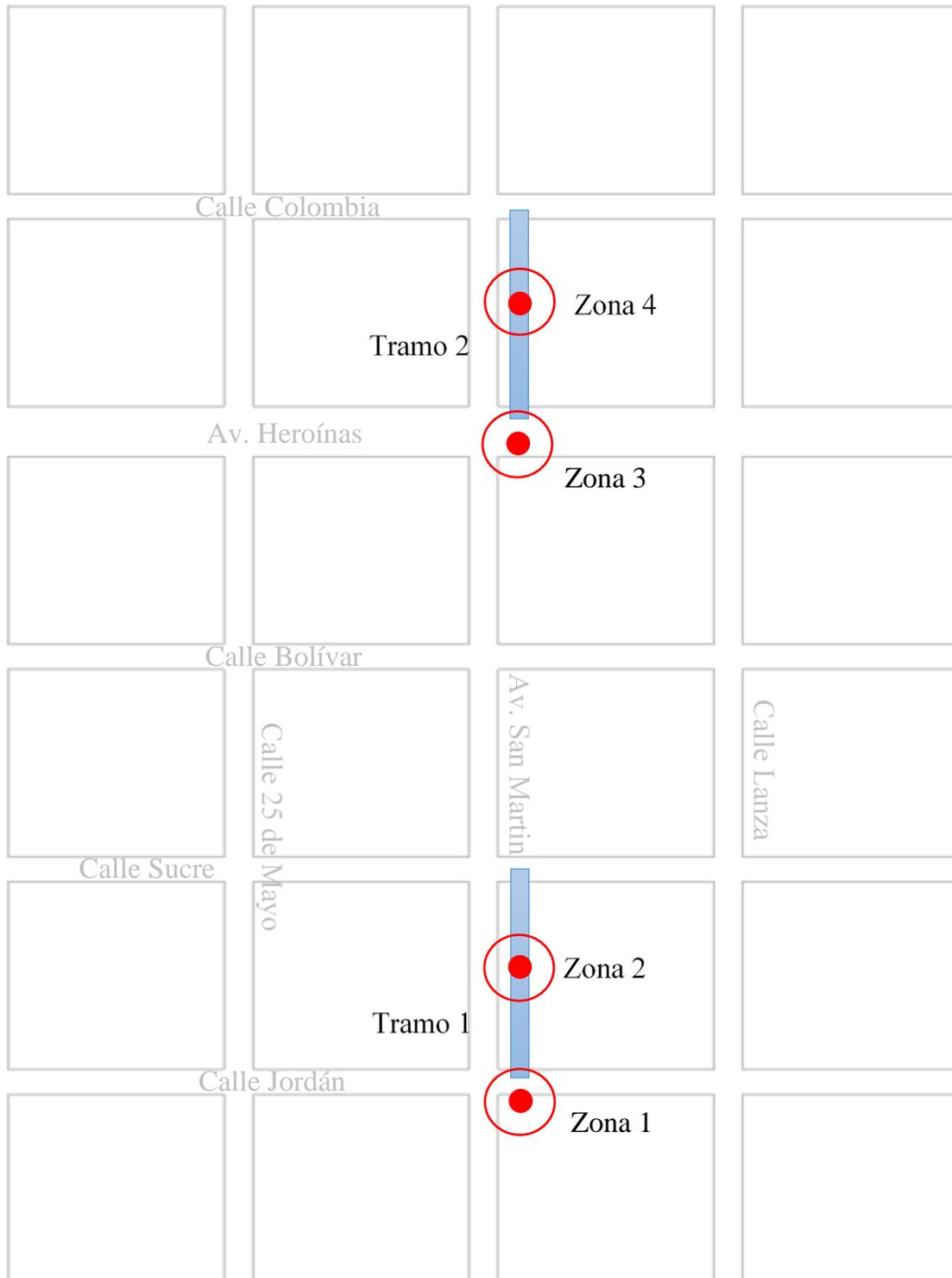


Figura 1. Zonas para la toma de imágenes termográficas.

El equipo utilizado fue un CAT S60 que viene equipado con una cámara FLIR integrada cuyas características se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones MyFLIR de S60.

Cámara térmica y visual con MSX	
Sensor Térmico	Tamaño de píxel de 17 mm, rango espectral de 8 a 14 mm.
Resolución térmica	80 x 60
Resolución visual	640 x 480
HFOV/VFOV	46° ± 1°/35°±1°
Frecuencia de imagen	8,7 Hz
Enfoque	Fijo 15 cm - Infinito
Integrado en Obturador	Automático/manual
Radiometría	
Rango dinámico de escena	-20°C - 120°C
Precisión	±5°C o ±5%
	Porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y la escena.
	60 s aplicables después del inicio cuando la unidad se encuentra entre 15°C y 35°C y la escena se encuentra entre 10°C y 120°C.
Sensibilidad Térmica (MRDT)	150 mK

Fuente: FLIR (2016)

Los termogramas resultantes del monitoreo (con un intervalo de 1 hora) fueron procesados y analizados mediante el programa *FLIRTools*.

FLIRTools además de ser una herramienta que facilita la creación de informes de inspección; permite editar y analizar imágenes con rapidez, ya que el programa tiene la opción de ajustar y modificar los parámetros; permite escalar el rango de temperaturas y/o cambiar la colorimetría según el escenario que sea conveniente al estudio.

4. RESULTADOS

Los resultados presentados corresponden al 22 de julio del 2018, puesto que permitía la detección de gradientes térmicos y la repetitividad de los datos. Es importante mencionar que dada la sensibilidad de la técnica a condiciones ambientales (nubosidad intermitente y lluvia) varios días fueron interrumpidos y descartados para este trabajo.

Los termogramas de las cuatro zonas fueron analizadas de manera visual en primera instancia, luego de manera cuantitativa para determinar el rango óptimo de toma de datos en la detección de defectos en pavimento flexible. Paralelamente se analizaron las cualidades del programa *FLIRTools* en beneficio de la técnica que se propone.

4.1 Visibilidad del deterioro de la capa de rodadura en las imágenes termográficas

Después del monitoreo en campo, se procedió a verificar la visibilidad del deterioro en las imágenes termográficas. La Figura 2 muestra la Zona 4 y la Figura 3 el termograma.

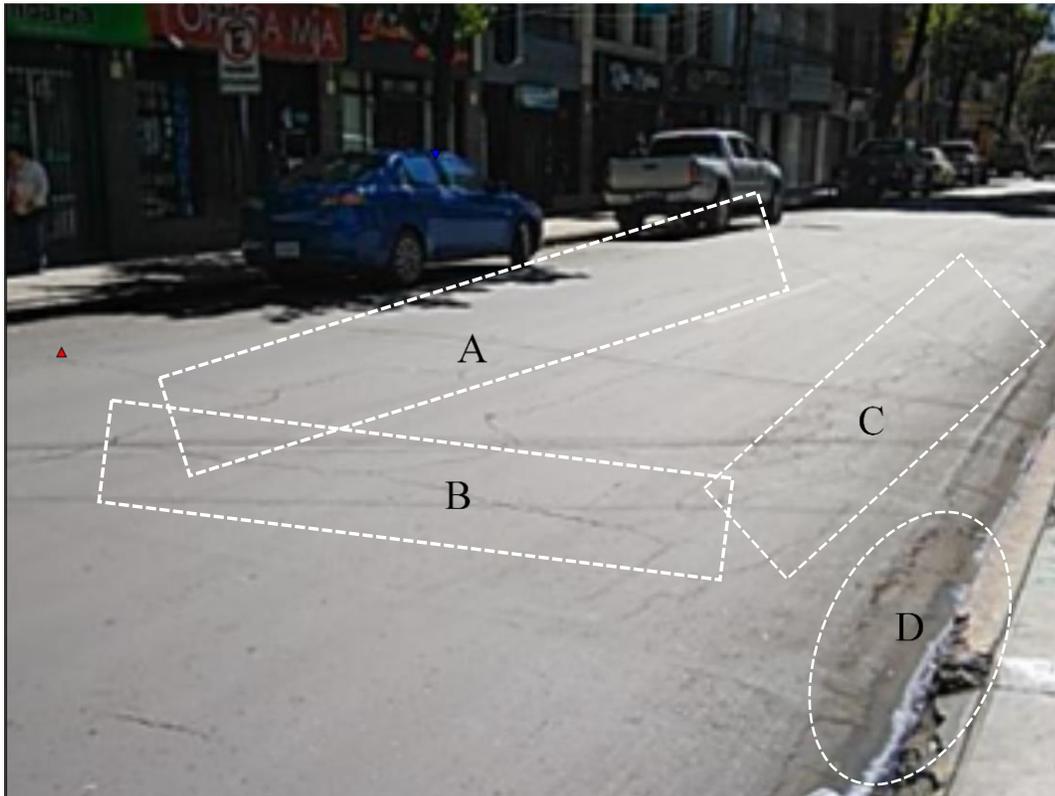


Figura 2. Imagen digital de la Zona 4.

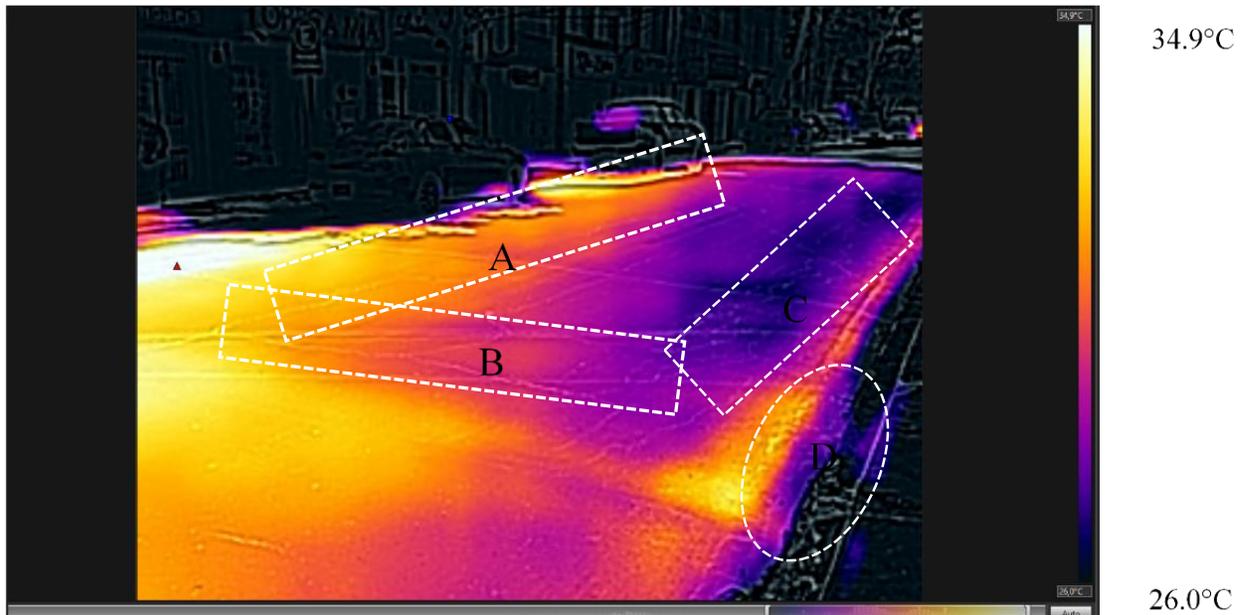


Figura 3. Imagen térmica de la Zona 4.

En la Figura 2 se distinguen fisuras transversales (B) y longitudinales (A), piel de cocodrilo (C), desprendimiento de agregados (D), entre otros defectos. En la Figura 3 se muestra la imagen termográfica de la zona anteriormente mencionada, donde se puede apreciar la colorimetría variada que pone en evidencia de manera preliminar una relación con las fallas observadas en la Figura 2. Nótese que la imagen termográfica de la Figura 3 muestra en la parte lateral derecha el rango de temperaturas, este rango varía de 26°C a 34.9°C. Las áreas de color amarillo con tendencia a blanco representan temperaturas altas y las áreas de color azul con tendencia a negro representan

temperaturas bajas. La paleta de colores puede ser modificada a conveniencia del usuario. No obstante, se observa que no existe uniformidad en el pavimento asfáltico, pues se distinguen áreas frías y calientes.

4.2 Variación de las imágenes termográficas a diferentes horas

Se analizó de manera visual la colorimetría diferenciada de la Zona 1 a diferentes horas del día bajo un mismo rango de temperaturas con la ayuda del programa *FLIRTtools*. En la Figura 4 se presentan las imágenes termográficas de la Zona 1 en tres horarios diferentes y en un mismo rango de temperaturas. El rango de temperaturas fue 23°C como máximo y 16°C como mínimo. Las Figuras 4a, 4b y 4c corresponden a las 7:00 a.m., 1:00 p.m. y 6:00 p.m., respectivamente.

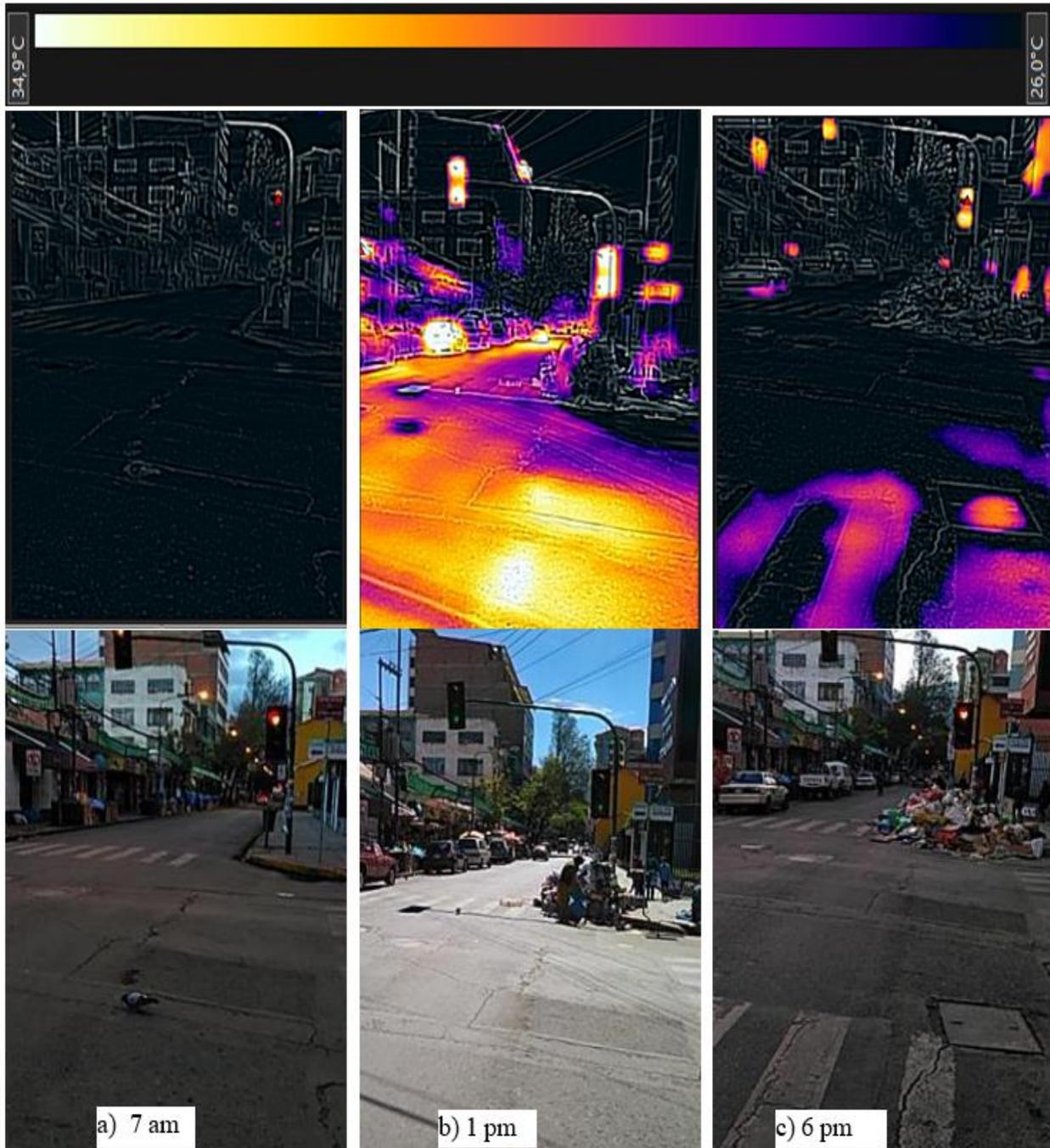


Figura 4. Visibilidad de las imágenes termográficas a diferentes horas del día de la Zona 1.

Al observar las imágenes termográficas en relación a las imágenes digitales se puede notar que, en la Figura 4b, correspondiente a la 1:00 p.m., el asfalto flexible presenta diferentes temperaturas sobre su superficie, no sucede lo mismo con la Figura 4a (7:00 a.m.) que no muestra ninguna diferencia de temperaturas en el pavimento. En la Figura 4c (6:00 p.m.) se puede apreciar que solo algunos sectores del pavimento muestran temperaturas cercanas al valor máximo, de acuerdo al rango de temperatura utilizado.

4.3 Determinación del rango horario óptimo durante el día para la toma de imágenes termográficas

Para determinar el rango óptimo horario de toma de imágenes termográficas fue utilizada la diferencia de temperaturas de dos sectores de diferentes características, a modo de obtener un diferencial que pueda ser evaluado mediante una gráfica.

Para obtener la diferencia de temperaturas se utilizó la ecuación (2), expresión propuesta en la literatura para el análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados (Washer et al., 2010; Farrag et al., 2016; Rocha et al., 2017).

$$\Delta T = T_c - T_f \tag{2}$$

Donde, ΔT es el diferencial o gradiente térmico ($^{\circ}\text{C}$), T_c es la temperatura del área deteriorada en estudio ($^{\circ}\text{C}$) y T_f es la temperatura de un área diferente a la deteriorada ($^{\circ}\text{C}$)

Las Figuras 5, 6, 7 y 8, muestran la variación de temperatura durante el tiempo de monitoreo de dos puntos con características diferentes. Cada figura presenta los resultados de una de las cuatro zonas analizadas, esto para que se pueda apreciar el diferencial térmico o gradiente de temperatura (ΔT).

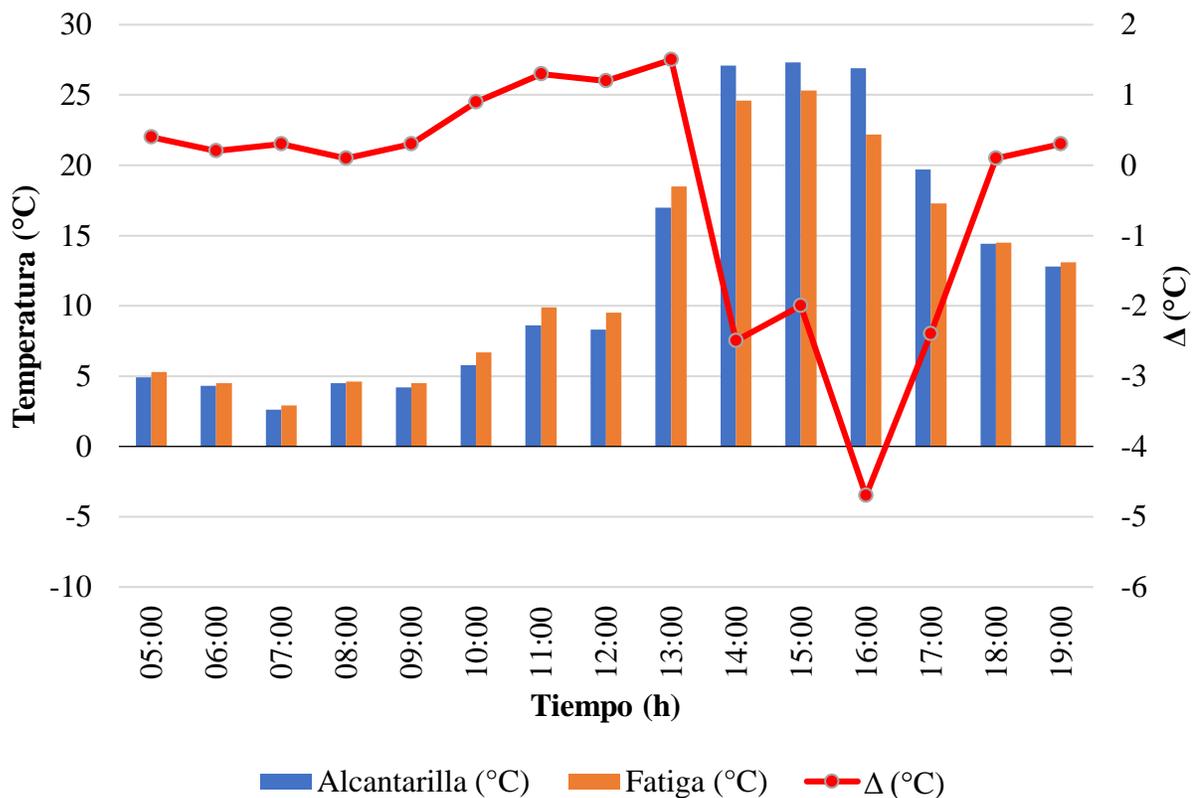


Figura 5. Temperaturas de la Zona 1.

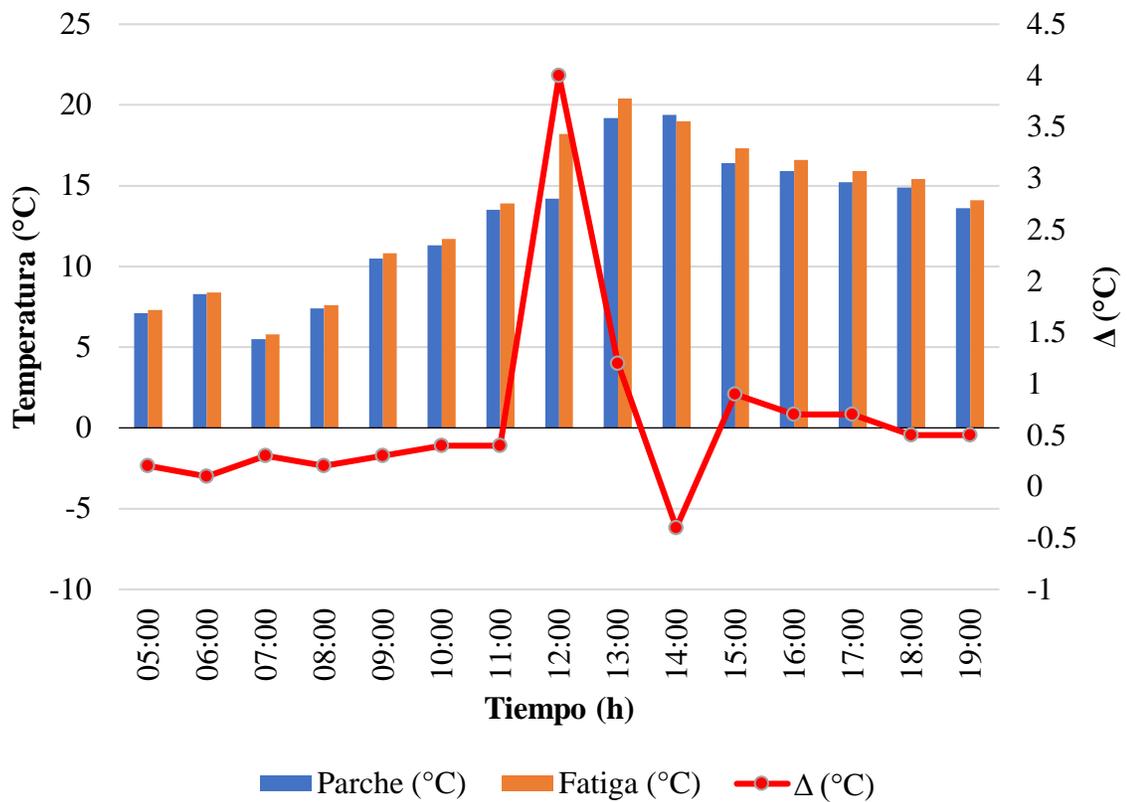


Figura 6. Temperaturas de la Zona 2.

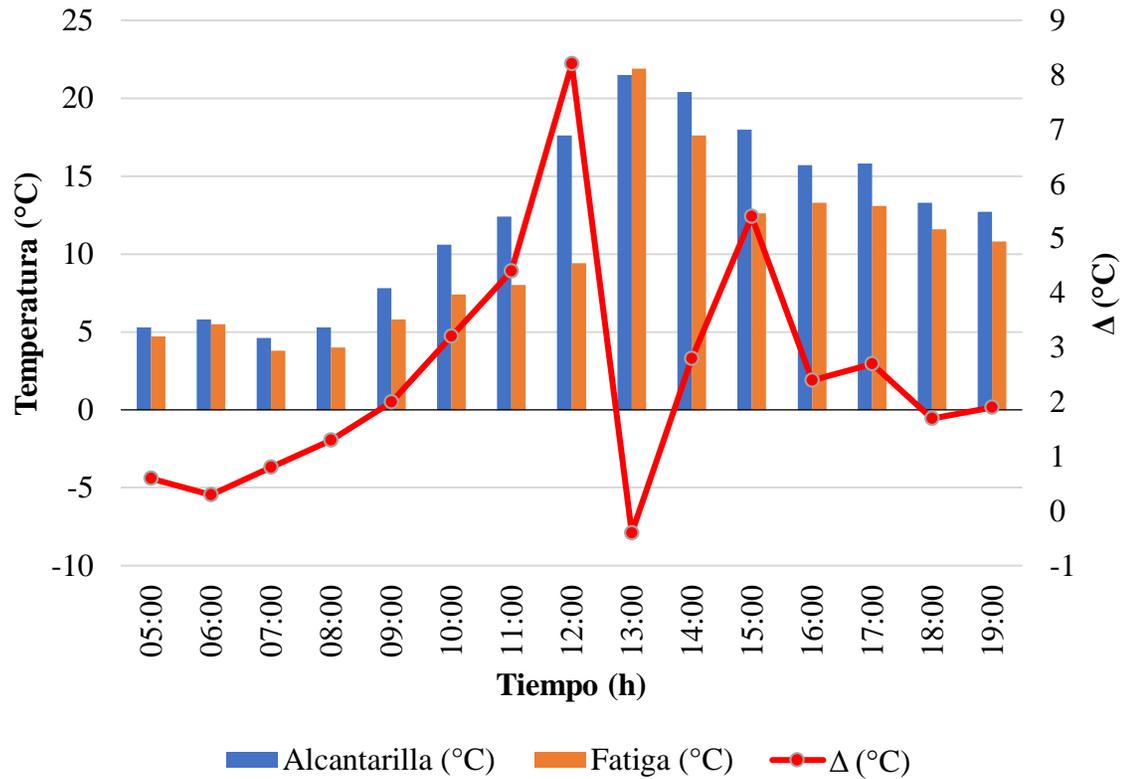


Figura 7. Temperaturas de la Zona 3.

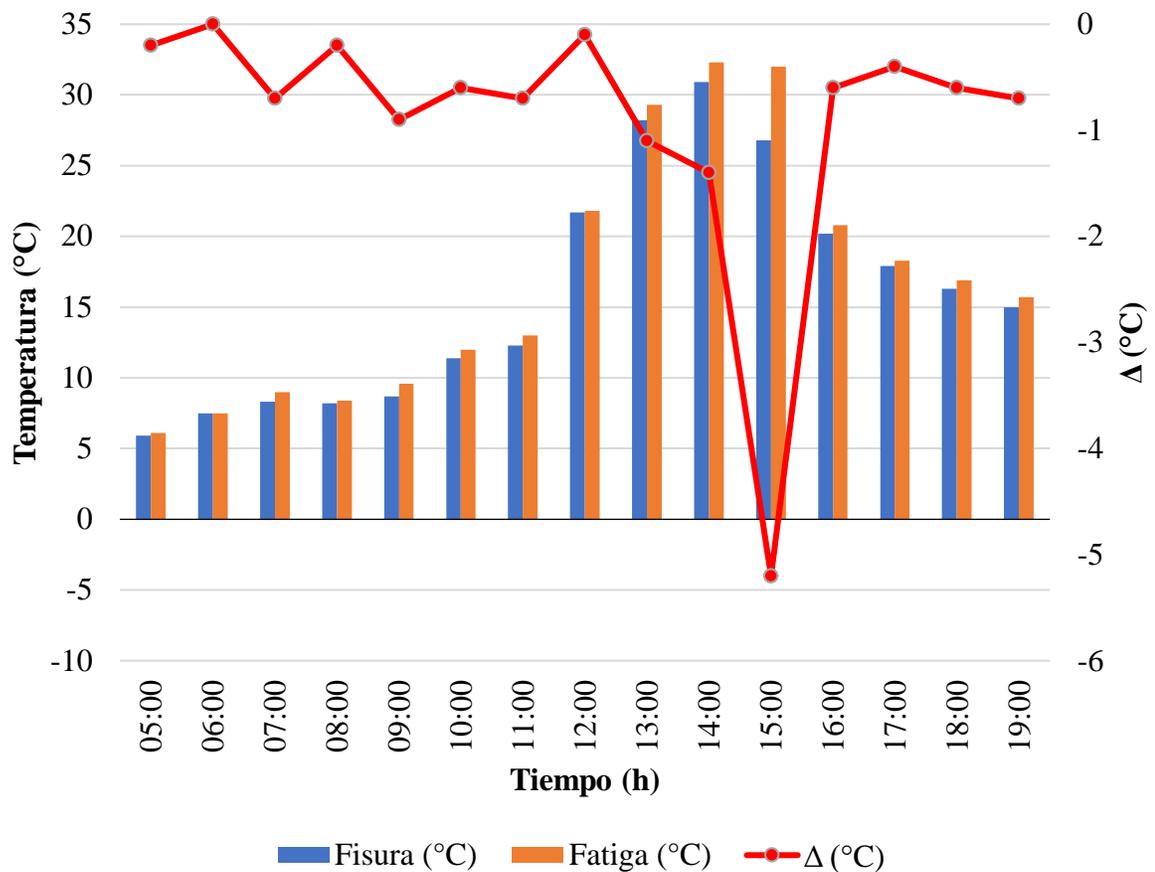


Figura 8. Temperaturas de la Zona 4.

La Figura 9 muestra el diferencial de temperaturas (ΔT) de las cuatro zonas en función del tiempo, además de la temperatura ambiente y la humedad relativa. Se puede observar que los valores máximos de los gradientes térmicos se dan entre las 11:00 a.m. y 4:00 p.m.; también se observa que desde las 5:00 a.m. a 8:00 a.m. los valores diferenciales son mínimos, siendo este periodo no apto para un análisis adecuado. El periodo de 4:00 p.m. a 7:00 p.m. muestra valores diferenciales pequeños, esto se debe al proceso de enfriamiento (noche), una vez que no está presente la radiación solar, los sectores calentados tienden a equilibrarse con el medio ambiente (Washer et al., 2010), Figura 4c. Se puede observar que el mejor periodo es de 11:00 a.m. a 4:00 p.m. porque existe mayor diferencial en la temperatura y permite la visualización de los defectos en los termogramas. Esto concuerda con otras investigaciones que indican que cuanto los gradientes térmicos sean más elevados los defectos son detectados (Solla et al., 2014; Farrag et al., 2016; Rocha et al., 2017). Respecto al comportamiento de los gradientes térmicos con la temperatura ambiente y la humedad relativa, se puede observar que los gradientes máximos ocurren cuando la temperatura ambiente es alta y la humedad relativa baja; contrariamente, cuando la temperatura ambiente es baja y la humedad relativa existen gradientes térmicos menores, 5:00 a.m. a 8:00 a.m. Lo que corrobora que la técnica es sensible a las condiciones ambientales (Rocha and Póvoas, 2017). Si bien el presente artículo solo se aplicó en una época del año, la técnica puede ser utilizada en cualquier estación del año. Es necesaria la exposición solar y una temperatura ambiente elevada. No obstante, los periodos óptimos de inspección cambiarían de acuerdo a la estación, dependiendo de las horas de exposición a la radiación solar y la temperatura del ambiente (Washer et al., 2010).

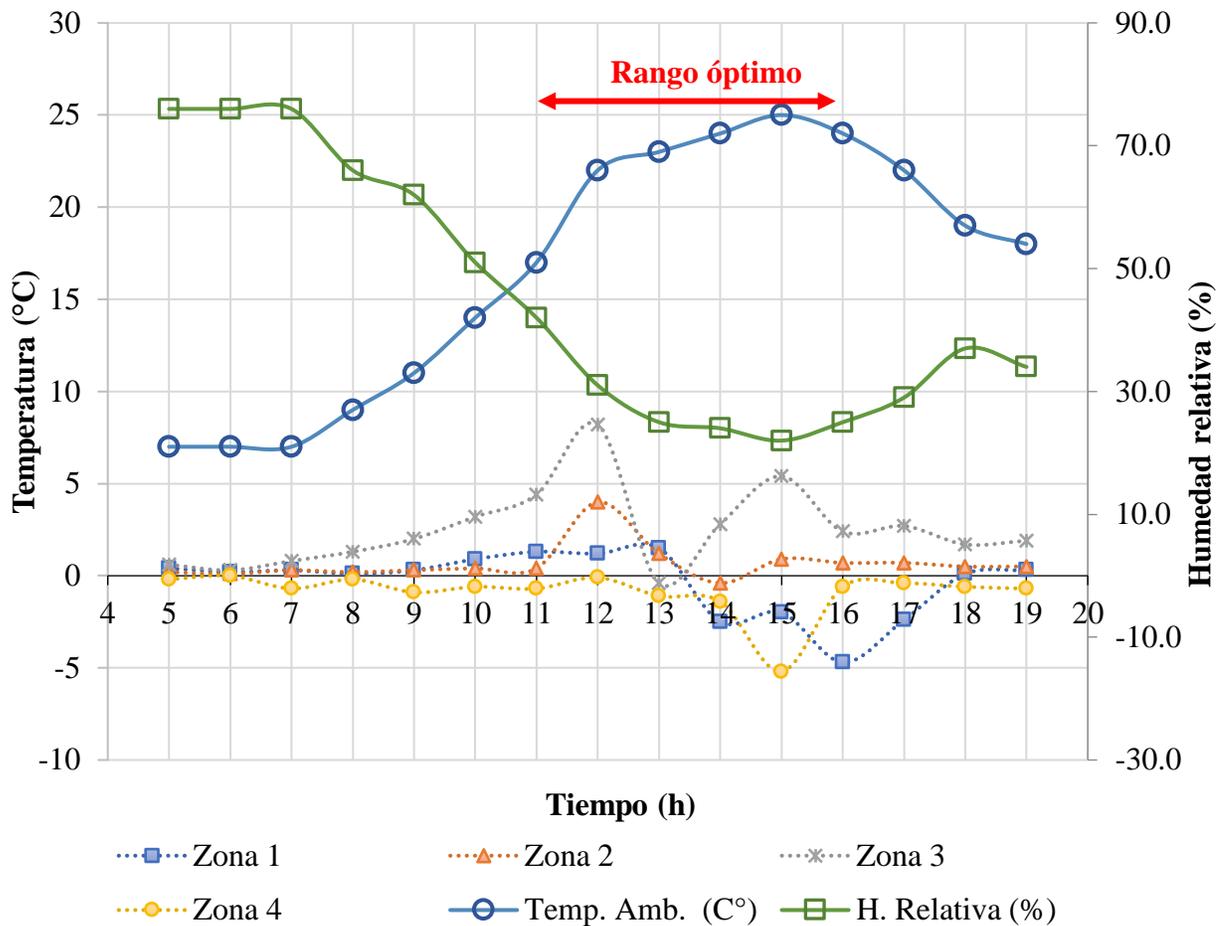


Figura 9. Gradiente de temperatura de las 4 zonas en estudio.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, la aplicación de la termografía infrarroja en la detección de daños de pavimentos flexibles arroja resultados positivos. El ensayo puede ser considerado como método de inspección preliminar no destructivo, puesto que, es capaz de analizar grandes áreas en pequeños intervalos de tiempo; sin embargo, estos periodos son limitados a las horas de la tarde. El rango óptimo de inspección encontrado fue de 11:00 a.m. a 16:00 p.m.

La técnica puede detectar anomalías no visibles, indicando el sector afectado, pero no el tipo y magnitud del daño. Este aspecto requiere de una inspección detallada donde con otros estudios y ensayos se podría determinar con exactitud el tipo y naturaleza de daño que refleja la colorimetría del termograma.

La técnica muestra gradientes térmicos bajos en días nublados a diferencia de días soleados con temperaturas altas. Los cambios bruscos de temperatura ambiente durante el seguimiento arrojan datos discontinuos que son perjudiciales para el análisis del comportamiento del deterioro en pavimentos flexibles, sobre todo tratándose de inspecciones preliminares. La aplicación de termografía infrarroja activa y otros ensayos no destructivos podría reducir estas incertezas y generar resultados más objetivos.

6. REFERENCIAS

- ABC – Administradora Boliviana de Carreteras (2011), “*Manual de diseño de conservación vial*”. ABC, La Paz, Bolivia, p. 365. Last access on May 30, 2019. Available at: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/09/manual_de_diseño_de_conservación_vial_abc.pdf
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J. (2013), *Infrared thermography for condition monitoring - A review*. Infrared Physics & Technology. 60(1):35-55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Bolivia (2006a), *Ley N°3507*, 27 de octubre de 2006. Último acceso 30 de mayo de 2019. Disponible en: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/07/Ley_3507.pdf
- Bolivia (2006b), *Decreto Supremo N°28946*, 25 de noviembre de 2006. Last access on May 30, 2019. Available at: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/07/Decreto_Supremo_N%C2%BA_28946.pdf
- Cengel, Y. (2003), “*Heat Transfer, a practical approach*”. McGraw-Hill, Segunda Edición, p. 932.
- Farrag, S., Yehia, S., Qaddoumi, N. (2016). *Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique*. Journal of Bridge Engineering, 21(3):1-15. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000779](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779)
- Fernandes, F. M., Pais, J. C. (2017), *Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR*. Construction and Building Materials, 154:1130-1138. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022>
- FLIR (2016), “*Smartphone S60 de Cat® Manual del usuario*”. Last access on May 28, 2019. Available at: <https://www.catphones.com/download/User-Manuals/S60-Smartphone/S60-Manual-del-usario-Espa%C3%B1ol.pdf>
- Garrido, I., Lagüela, S., Arias, P. (2018), Infrared Thermography’s Application to Infrastructure Inspections. *Infrastructures*, 3(3):1-19. Doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030035>
- Golrokh, A. J., Lu, Y. (2019), *An experimental study of the effects of climate conditions on thermography and pavement assessment*. International Journal of Pavement Engineering, 1-12. Doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1656809>
- Janků, M., Cikrle, P., Grošek, J., Anton, O., Stryk, J. (2019), *Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges*. Construction and Building Materials, 225:1098–1111. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.320>
- Khamzin, A. K., Varnavina, A. V., Torgashov, E. V., Anderson, N. L., Sneed, L. H. (2017), *Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment*. Construction and Building Materials, 141:130-139. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.105>
- Lin, S., Ashlock, J., Williams, R. C., Lee, H. D., Wang, Y. (2018), *Evaluation of three nondestructive testing techniques for quality assessment of asphalt pavements*. Nondestructive Testing and Evaluation, 33(4):361-375. Doi: <https://doi.org/10.1080/10589759.2018.1484921>
- Los Tiempos (2016), “*Caos de tráfico vehicular en la ciudad de Cochabamba*”. Last access on May 30, 2019. Available at: <http://www.lostiempos.com/actualidad/opinion/20161221/columna/caos-trafico-vehicular-ciudad-cochabamba>

- Los Tiempos (2016), “Población protesta por el mal estado de las calles en Cochabamba”. Last access on June 25, 2019. Available at: <https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20160420/poblacion-protesta-mal-estado-calles-cochabamba>
- Los Tiempos (2019), “Cochabamba: ciudad de baches y eternas fallas en el asfalto”. Último acceso 25 de junio de 2020. Disponible en: <https://www.lostiempos.com/especial-multimedia/20190408/cochabamba-ciudad-baches-eternas-fallas-asfalto>
- Lovera, G. C. (2017), “La política caminera del modelo de capitalismo de Estado de 1952 – 1985”, Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés, p. 126.
- Muñoz-Potosi, A., Pencue-Fierro, L., León-Téllez, J. (2009), *Análisis Termográfico Para La Determinación De Puntos Críticos En Equipos Mecánicos Y Eléctricos*. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 7(1):1-4. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90312171013>
- Opinión (2018), *Alcaldía inicia reparación de baches en las calles*. Último acceso 25 de junio de 2020. Disponible en: <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/alcald-iacute-inicia-reparaci-oacute-n-baches-calles/20180220000500605048.html>
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S. A., Jameel, M. (2016), *Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*. Construction and Building Materials. 107(15):58-86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Revillas, S. (2011), “Guía de la termografía infrarroja, aplicaciones en ahorro y eficiencia energética”. eBuilding, Madrid, España, p. 189. Available at: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.pdf>
- Rocha, J., Póvoas, Y. (2017), *Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art*. Revista ALCONPAT, 7(3):200-214. Doi: <https://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Rocha, J., Póvoas, Y., Silva, M., Monteiro, E. (2017), *Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha*. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2(3): 58-65. Doi: <https://doi.org/10.25286/rep.v2i3.688>
- Solla, M., Lagüela, S., González-Jorge, H., Arias, P. (2014), *Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings*. Ndt & E International, 62:55-65. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.006>
- Tosti, F., Ciampoli, L. B., D'Amico, F., Alani, A. M., Benedetto, A. (2018), *An experimental-based model for the assessment of the mechanical properties of road pavements using ground-penetrating radar*. Construction and Building Materials, 165: 966-974. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.179>
- Vyas, V., Patil, V. J., Singh, A. P., Srivastava, A. (2019), *Application of infrared thermography for debonding detection in asphalt pavements*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 9:325-337. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00337-8>
- Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N. (2010), *Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete*. Journal of Bridge Engineering, 15(4): 384-390. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000117)

Análisis crítico y propuestas de innovación al método de ensayo de acción de calor y choque térmico a luz de la ABNT NBR 15575 (2013)

L. S. Lorenzi¹ *, K. J. Stein¹ , L. C. P. Silva Filho¹ 

*Autor de Contacto: luciani.lorenzi@ufrgs.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.390>

Recepción: 21/01/2019 | Aceptación: 12/12/2019 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Los ensayos de la ABNT NBR 15575:2013 hacen parte del conocimiento del sector de la construcción civil, pero el ensayo de acción de calor y choque térmico es innovador, y no posee un histórico consolidado. El objetivo de la investigación es analizar el ensayo críticamente y presentar propuestas. El método de investigación es meta-análisis de datos. Los resultados demostraron que el ensayo es bastante impreciso en la descripción del procedimiento y equipos. Fueron propuestos ajustes e innovaciones al ensayo para proporcionar resultados más fidedignos, sin embargo, no fueron realizadas propuestas en cuanto a la inspección visual y a los números de ciclos. Se concluye que la falta de información del ensayo tiene responsabilidad directa en los resultados y que las propuestas sugeridas tienen potencial para ser incorporadas.

Palabras clave: acción de calor y choque térmico; durabilidad; evaluación de desempeño de edificación.

Citar como: Lorenzi, L. S., Stein, K. J., Silva Filho, L. C. P. (2020), “Análisis crítico y propuestas de innovación al método de ensayo de acción de calor y choque térmico a luz de la ABNT NBR 15575 (2013)”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 364 – 376, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.390>

¹ Civil Engineering Department, School of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

Editor asociado responsable de este artículo: Pedro Garcés Terradillos

Contribución de cada autor

En este trabajo la autora L. S. Lorenzi contribuyó con la idea original, experimentación, desarrollo de un modelo, recolección de datos, escritura del trabajo y discusión de resultados. El autor K. J. Stein contribuyó con la experimentación, recolección de datos, escritura del trabajo y discusión de resultados. El autor L. C. P. Silva Filho contribuyó con la idea original y discusión de resultados.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Critical analysis and innovation propositions to the heat and thermal shock test method of the Brazilian Standard NBR 15575 (2013)

ABSTRACT

The tests of Brazilian Standard NBR 15575: 2013 are part of the knowledge of the civil construction industry, but the heat and thermal shock test is innovative and does not have a consolidated history. The research objective is to analyze the testing critically and present proposals based on data meta-analysis. Results showed that the test is very inaccurate in describing the procedure and equipment. This study proposed adjustments and innovations in the test to provide more reliable results, but it does not make propositions regarding visual inspection and the number of cycles. The study concluded that the lack of information on the testing has direct responsibility for the results and that the suggested proposals have the potential to be incorporated. **Keywords:** heat action and thermal shock; durability; evaluation of building performance.

Análise crítica e proposições de inovação ao método de ensaio de ação de calor e choque térmico à luz da ABNT NBR 15575 (2013)

RESUMO

Os ensaios da ABNT NBR 15575:2013 fazem parte do conhecimento do setor da construção civil, mas o ensaio de ação de calor e choque térmico é inovador e não possui um histórico consolidado. O objetivo da pesquisa é analisar o ensaio criticamente e apresentar proposições. O método de pesquisa é a meta-análise de dados. Os resultados demonstraram que o ensaio é bastante impreciso na descrição do procedimento e do equipamento. Foram propostos ajustes e inovações no ensaio para proporcionar resultados mais fidedignos, porém não foram realizadas proposições quanto à inspeção visual e aos números de ciclos. Conclui-se que a falta de informação do ensaio tem responsabilidade direta nos resultados e que as proposições sugeridas têm potencial para serem incorporadas.

Palavras-chave: ação de calor e choque térmico; durabilidade; avaliação de desempenho de edificação.

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.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción civil brasileña se encuentra en un período de grandes transformaciones en el área tecnológica. El aumento de la incorporación de nuevos materiales, en especial en las edificaciones habitacionales, es la ABNT NBR 15575 (2013), en adelante NBR 15575, que está promoviendo cambios positivos y significativos en el sector. Hay un aumento del interés del mercado de la construcción civil en conocer el comportamiento en el uso de los sistemas constructivos de las edificaciones. Eso proporciona una demanda por ensayos y análisis de los resultados, reflejando un aumento en la demanda de servicios para los laboratorios e instituciones de evaluaciones técnicas, bien para el análisis de las normas involucradas.

Las normas no son absolutas, tampoco perfectas, por eso precisan de actualizaciones para acompañar la velocidad de los cambios tecnológicos (Borges, 2012). Los métodos de evaluación y parámetros establecidos en normas, principalmente la NBR 15575, deben ser ajustados con el pasar del tiempo (Thomaz, 2012 y 2013). En función de la poca experiencia nacional en ensayos experimentales de desempeño, para caracterizar el comportamiento de sistemas constructivos, fueron utilizados métodos importados de países con mayor volumen de investigaciones realizadas en ese tema. Resaltando que, aunque el método sea adecuado, las condiciones de esos países son distintas de la realidad brasileña, en la cual se observa la falta de infraestructura para la realización de ensayos. Ese hecho ya era alertado por Mitidieri Filho (1998) al exponer que las metodologías para la evaluación de desempeño fueron traídas de experiencias de los países desarrollados, donde las condiciones son bien diferentes, originando criterios muy rigurosos para la realidad existente. Otro factor que el autor destaca es lo que respecta a los ensayos y parámetros establecidos en Brasil, durante la década de 1980, direccionados a sistemas constructivos con tecnología convencional, excluyendo de cierta forma, los sistemas constructivos innovadores.

El uso de sistemas convencionales como referencia y por comparación para juzgar sistemas innovadores es una práctica normal, pero no es una práctica correcta (Mitidieri Filho, 2007). La NBR 15575 tiene algunos parámetros que pueden estar disociados de la realidad brasileña y que hace necesaria la realización de ajustes de la norma. Sin embargo, es fundamental comenzar a implantar la norma, aun cuando sean utilizados parámetros limitantes por debajo de los límites internacionales (Thomaz, 2013).

La falta de un volumen expresivo de ensayos y de estudios sobre la representatividad de parámetros en cuanto a los resultados obtenidos, correlaciones entre procedimientos de ensayo y rangos esperados de resultados, son factores que ponen en duda los ensayos y parámetros establecidos en la NBR 15575. En Brasil no se tienen ensayos suficientes para la caracterización de sistemas constructivos, sean ellos, innovadores o no. Ante este contexto, varias instituciones desarrollaron o adaptaron procedimientos de ensayo para la evaluación de desempeño, específicamente el Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) y algunos laboratorios de universidades. Esa actitud es incentivada por Thomaz (2013) y Villas Boas (2013) cuando expresan que hay mucho por mejorar en los requisitos, criterios, métodos de evaluación y parámetros establecidos por la NBR 15575, visto que muchos sistemas constructivos aún no están contemplados.

Un análisis crítico de los ensayos para la evaluación del desempeño de edificaciones teniendo como base la NBR 15575, concluyó que ensayos en el área de seguridad en cuanto al desempeño estructural poseen un histórico consistente, pero necesitan ser perfeccionados. Los otros ensayos de desempeño en cuanto a seguridad, desempeño contra incendio y de uso y operación se encuentran en una fase de maduración, en la cual empiezan a tener el destaque merecido. Los ensayos relativos al área de habitabilidad, los ensayos de desempeño acústico y de estanqueidad al agua son realizados en mayor número y poseen un histórico importante para la evaluación de

desempeño de edificaciones. En cuanto a los demás ensayos de desempeño de edificaciones recomendados en la NBR 15575, no existe un histórico significativo que se destaque, principalmente, cuando son utilizados para evaluar los elementos que componen los sistemas constructivos. Entre esos ensayos, el de acción de calor y choque térmico es considerado nuevo y, por lo tanto, no tiene histórico consistente (Lorenzi, 2013).

Con la intención de aprovechar la experiencia, relativa a los ensayos de desempeño de edificaciones, acumulada a lo largo de los años por el LEME/UFRGS (Laboratorio de Ensayos y Modelos Estructurales de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul), este trabajo realizó una evaluación del procedimiento y de los parámetros de ensayo de acción de calor y choque térmico para SVVE (sistemas de cerramientos verticales externos).

La idea era identificar posibles ajustes e innovaciones que pudieran ser aplicadas, incorporando avances en los procedimientos y permitiendo resultados más precisos referentes al comportamiento en uso de las edificaciones. El ajuste de algunos parámetros de aceptación también propició una evaluación más coherente y justa de los sistemas.

Teniendo por base lo expuesto, fue establecido como objetivo principal de este trabajo realizar un análisis crítico del ensayo de acción de calor y choque térmico, establecido y recomendó en la NBR 15575 para SVVE para evaluar el comportamiento en cuanto a durabilidad durante la vida útil y presentar propuestas de avance al procedimiento y parámetros de aceptación.

2. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE EDIFICACIONES

La propuesta de evaluación de desempeño de la NBR 15575, está basada en un conjunto de diferentes instrumentos: análisis teóricos, simulaciones, ensayos experimentales e inspecciones técnicas. Cada uno contribuye, de alguna forma para evaluar, si los requisitos establecidos para cada criterio de desempeño están siendo atendidos.

El cambio de cultura en la cadena de construcción civil, en utilizar métodos de evaluación, más precisamente en ensayos para caracterizar el comportamiento de los sistemas constructivos, puede ocurrir en dos momentos distintos: el primero referido al uso de ensayos en edificaciones culminadas, para solucionar situaciones de conflicto entre incorporador/constructor y usuario. El segundo se refiere a los ensayos realizados para caracterizar el comportamiento en uso de los sistemas constructivos que son y/o serán aplicados en las edificaciones (Borges, 2008). La experiencia europea en el área, indica que la cultura del concepto de desempeño de edificaciones provoca la práctica de la realización de ensayos y que ese escenario es proyectado para el Brasil en los próximos años, teniendo como resultado el aumento de la demanda por este tipo de ensayo. Sin embargo, pueden ocurrir atrasos significativos en ese escenario en consecuencia de la limitación de la capacidad laboratorial instalada del país (Lorenzi, 2013).

La evaluación de desempeño de un sistema constructivo visa identificar si el sistema puede ser usado para producir edificios y si es capaz de atender las exigencias de desempeño. Eso solo es posible cuando se trabaja con un equipo multidisciplinario y de experiencia en el área y si hay una infraestructura disponible para la realización de esta evaluación. Ese conjunto viabiliza, cuando sea necesario, ajustar o crear nuevos patrones de desempeño para los sistemas constructivos (Becker, 2001). Otro aspecto para destacar se refiere a los métodos y procedimientos estandarizados que permiten ser reproducidos y la verificación en cuanto a la atención de los requisitos de desempeño de edificaciones. Eso es extremadamente relevante cuando se trata del análisis de la viabilidad de uso de un sistema constructivo (Mitidieri Filho, 2007).

Brasil está en la fase de expectativa en cuanto la evolución y perfeccionamiento de ensayos recomendados en la NBR 15575 y para aportar en esta tarea, es necesario efectuar análisis críticos sobre la práctica de estos, identificando lagunas y promoviendo ajustes que permitan avanzar en

los métodos y procedimientos de ensayos. Es momento de consolidación de prácticas y discusiones de métodos y procedimientos de evaluación de desempeño de edificaciones, con especial atención a los ensayos y a los parámetros de aceptación.

2.1 Ensayo de acción de calor y choque térmico

El ensayo de acción de calor y choque térmico para evaluar el requisito de durabilidad es presentado en la NBR 15575-4, sistemas de cerramientos verticales internos y externos (SVVIE) de edificaciones habitacionales. El objetivo de ese ensayo es analizar el comportamiento del SVVE en cuanto a los daños, cuando sometido a ciclos sucesivos de calentamiento por fuente de calor y enfriamiento por chorros de agua. La idea es simular el stress que las edificaciones sufren durante su vida útil por medio de variación de temperatura y humedad asociada a la acción de las lluvias sobre el elemento (pared) calentado. El ensayo de acción de calor y choque térmico es uno de los ensayos acelerados de envejecimiento utilizados para evaluar el comportamiento potencial del SVVE en uso. El ensayo promueve el aumento de la frecuencia de la ocurrencia de agentes que inducen el deterioro. En ese caso el agente deteriorante es la variación brusca de temperatura en la superficie del elemento, cuando hay un choque térmico. Esa situación sucede cuando, por ejemplo, la fachada de la edificación es tocada por una lluvia repentina, luego de un día de bastante incidencia solar (Fontenelle, 2012).

Uno de los aspectos importantes para el estudio de la durabilidad de fachadas y su comportamiento frente a ciclos de calentamiento y enfriamientos bruscos. La diferencia de temperatura entre la superficie y su interior puede provocar tensiones de elevada magnitud, deteriorando sistemas de fachadas, en particular los sistemas ligeros (con pequeña inercia térmica) y aquellos compuestos de varias capas, con elementos no homogéneos (Oliveira et al., 2014). Cuando la variación de temperatura es repentina, la tasa de carga en el elemento es alta, sin embargo, la propagación de las deformaciones de origen térmica en el elemento depende de la velocidad de respuesta del mismo hasta llegar al equilibrio (Esquivel, 2009).

El ensayo de acción de calor y choque térmico establecido en la NBR 15575-4 consiste en aplicar diez ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento para cada probeta representativa del SVVE. La superficie expuesta a la acción de calor debe quedar con temperaturas entre $80^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante una hora. Luego de ese período, es realizada la aspersion de agua en la superficie calentada hasta alcanzar temperaturas en el rango de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$. El procedimiento de ensayo requiere una probeta de extensión variable (ancho) entre 1 metro a 1,40 metros y altura de una pared. La probeta es colocada en un dispositivo de fijación que deja el elemento simplemente apoyado en el borde inferior y superior.

Las recomendaciones de la NBR 15575 en cuanto a la evaluación del desempeño del SVVE toman en consideración la degradación causada por el choque térmico, como: fisuras, fallas, desprendimiento, ampollas, deterioro entre otros, en consecuencia, de la dilatación térmica, retracción y expansión. También es considerado en esa evaluación el parámetro de desplazamiento horizontal máximo ($h/300$), donde h es la altura del elemento. Para medir el desplazamiento horizontal del elemento se coloca en el centro del elemento, en la cara opuesta a la calentada y enfriada, un deflectómetro.

Entre la norma nacional y las internacionales, referidas al choque térmico en SVVE, se constató que hay divergencias en cuanto a categorías y parámetros. Por ejemplo, la temperatura de calentamiento para la superficie expuesta del SVVE recomendada por la NBR 15575-4 difiere de la directriz ETAG 0004 (2008) que establece una temperatura de $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y de las normas ISO 8336 (2009) y ASTM C1185-8 (2012) que establecen la temperatura de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Otro punto divergente es en cuanto a la medición de las temperaturas en la superficie. En la norma nacional (NBR 15575), la medición es realizada por termopares acoplados directamente en la superficie de la probeta, en la norma americana (ASTM C1185-8) los termopares son fijados en pequeñas placas

metálicas pintadas de negro, donde las placas son las que se fijan en la superficie de dicha probeta (Oliveira et al., 2014).

La Tabla 1 resume las diferencias de parámetros adoptados en los métodos de ensayos de normas extranjeras y brasileñas en relación, a algunos de esos aspectos anteriormente explicados.

Tabla 1. Diferencia de parámetros adoptados entre los métodos de ensayos de normas extranjeras y la brasileña.

Categoría	Parámetros	Detalles de los parámetros		
		NBR 15575-4 (ABNT, 2013b)	C1185-8 (ASTM, 2012) y ISO 8336 (ISO, 2009)	ETAG 004 (ETAG, 2008)
Calentamiento	Método de medición de la temperatura del ensayo	Medición directa, hecha por medio de termopares posicionados sobre la superficie calentada de la probeta	Medición indirecta, medida de la probeta de referencia/placa metálica negra	Medición directa, hecha por medio de termopares posicionados sobre la superficie calentada de la probeta
	Tiempo para alcanzar la temperatura de calentamiento máxima	No establecido	No establecido	1 h
	Temperatura máxima del ensayo	80 ± 3°C	60 ± 5°C	70 ± 5°C
	Tiempo de permanencia en la fase calentada	1 h	2 h 55 min	2 h
	Variación admitida de temperatura entre el centro y bordes de la probeta	± 3°C	No establecido	No establecido
Enfriamiento con agua	Temperatura del agua	Indefinida, pero hasta alcanzar la temperatura superficial de la probeta de 20 ± 5°C	≤ 30 °C	15 ± 5°C
	Cantidad de agua	Indefinida	3,79 l/min	≥ 1,0 l/m ² min, lo que equivale a aproximadamente 6 l/min
	Tiempo de aspersion	Indefinido, pero hasta alcanzar la temperatura superficial de 20 ± 5°C	2 h 55 min	1 h
	Distribución sobre la superficie	Uniforme	Uniforme	Uniforme
	Temperatura luego del enfriamiento de la probeta	20 ± 5°C	No establecido	No establecido

Ciclos	Tiempo de cada ciclo	Aproximadamente 6 h pero, depende de la composición de la pared	6 h	6 h
	Cantidad de ciclos	10	25	80
	Intervalo entre ciclos	No establecido	5 min.	2 h
Probeta	Dimensión	$\geq 3,0 \text{ m}^2$ (1,2 m x 2,5 m)	$\geq 3,5 \text{ m}^2$	$\geq 6,0 \text{ m}^2$
	Restricción de movimiento de bordes	Sin restricción	Con restricción	Sin restricción
	Color de la superficie	No establecido	No establecido	No establecido

Fonte: Oliveira et al. (2014)

El análisis interpretativo de los ensayos de desempeño de edificaciones establecidos de la NBR 15575 realizado por Lorenzi (2013) originó un mapeo con “ensayos x edificaciones x criterios de análisis interpretativa” sirviendo de base para identificar los ensayos a ser analizados críticamente tanto en relación a la interpretación, como a los procedimientos, equipos y parámetros. El resultado del mapeo identificó que uno de los ensayos que necesita ser perfeccionado es el ensayo de acción de calor y choque térmico.

En el estudio realizado por Oliveira et al (2014) también fueron propuestas mejoras para el ensayo de acción de calor y choque térmico, cuando es aplicado a SVVE constituido de elementos ligeros ($\leq 60\text{kg/m}^2$), considerando nuevos parámetros, procedimientos o condiciones para la realización del referido ensayo. La Tabla 2 presenta un resumen de las propuestas de avance al ensayo de acción de calor y choque térmicos.

Tabla 2. Propuestas de avance para el ensayo de acción de calor y choque térmico.

Categoría	Lorenzi (2013)	(Oliveira et al., 2014)
Calentamiento	-	$80 \pm 3^\circ\text{C}$ SVVE condiciones usuales $60 \pm 3^\circ\text{C}$ SVVE condiciones especiales
	Tiempo variable de acuerdo con la composición del SVVE	Tiempo mínimo de 1h para el SVVE llegar a temperatura máxima
	-	Aumento de exposición de 1h para 2h de calentamiento
	Toda el área de la probeta debe ser expuesta al calor	Identificar distorsiones entre el centro y los bordes de la probeta
	Temperatura homogénea de la probeta	Control de W/m^2
Enfriamiento con agua	Mantener el agua enfriada a temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$	Controlar la temperatura de agua de enfriamiento
	Tiempo de enfriamiento, aspersión y velocidad con que ocurre la variación de temperatura.	Tiempo de aspersión, enfriamiento y velocidad en que la variación de temperatura ocurre
	Agua de enfriamiento en temperatura constante	Forma de medición
	Aspersión de chorros de agua constante y uniforme para alcanzar la probeta, controlando la presión de agua	Distribución superficial
	Reuso del agua de ensayo	-

Ciclos	Ciclos sucesivos sin intervalo	Tiempo entre ciclos para estabilización de temperatura
Probeta	Ancho mínimo 1,0 m a 1,40m	Ancho mínimo 2,40m
	Altura 2,50 m	Altura 2,50m
	Con todos los detalles del SVVE	Con todos los detalles del SVVE
	Restricción lateral	Vinculación lateral
	Apoyado en el inferior y restringido en el superior	Apoyado en el inferior y articulado en la parte superior
	-	Color de la cara externa: absorción $\geq 0,5$ para alcanzar 80°C en menor tiempo
Equipamiento del panel radiante y aspersión de agua	Radiación por resistencias eléctricas	Radiación lámparas o resistencias eléctricas
	Área del panel radiante = área de la probeta	-
	Posibilidad de inspección a cada ciclo	
Parámetro de desplazamiento horizontal	Disminuir en 50% el límite para el desplazamiento horizontal	-
	Incrementar el desplazamiento horizontal residual (d_{hr})	-
Ensayo de Estanqueidad al agua de lluvia	Antes y después del ensayo de acción de calor y choque térmico	Antes y después del ensayo de acción de calor y choque térmico

Unos de los puntos más importantes a ser incorporado al ensayo es el referente a fijación de la probeta, para la realización del ensayo en ambiente de laboratorio. La contención de la probeta debe restringir la expansión ó la contracción de la probeta en el sentido de longitudinal, permitiendo el libre movimiento vertical y el desplazamiento transversal, es decir que no ofrezca ninguna restricción a la formación de la flecha consecuencia del gradiente de temperatura en la sección de la pared. Esas consideraciones están direccionadas para los sistemas que pueden presentar desplazamientos significativos a razón de variaciones dimensionales por efecto de temperatura y humedad, en casos como estos, es indicado hacer las contenciones (Fontenelle y Meditidieri Filho, 2016).

El ensayo no presenta un resultado único para todos los sistemas constructivos. La respuesta del elemento al choque térmico está condicionada a sus condiciones de contorno. Si se presentan restricciones externas a la libre deformación del sólido, el estado de tensiones es más grave; es el caso de la exposición al flujo de calor y simétrica en toda la superficie del sólido, la transferencia de calor ocurrirá hasta alcanzar el equilibrio térmico, eso es que la temperatura será la misma en todo el sólido (Esquivel, 2009).

3. METODOLOGÍA

La estrategia experimental fue realizada en base a las propuestas de avance recomendadas por Lorenzi (2013). Fueron ensayadas 12 probetas (sistema constructivos convencionales e innovadores, ligeros y pesados, rígidos y flexibles) totalizando 280 ciclos, de los cuales 220 ciclos son correspondientes a 10 probetas y 60 ciclos a 2 probetas. La estrategia experimental buscó atender la demanda básica de trabajo: analizar críticamente las propuestas de avance, para mejoría de los resultados de los ensayos.

Las propuestas de avance incorporados fueron:

- Tiempo de calentamiento de acuerdo con el sistema constructivo;
- Mantener el agua en contención a $20 \pm 5^\circ\text{C}$;
- Tiempo de enfriamiento de acuerdo con el sistema constructivo;
- Agua para enfriamiento siempre con la temperatura en el intervalo de $20 \pm 5^\circ\text{C}$;
- Aspersión de agua uniforme ($3 \text{ l/m}^2/\text{min.}$), constante y con presión sin interferencia en el sistema constructivo;
- Reutilización del agua del ensayo;
- Ciclos sucesivos, sin intervalo;
- Inspección visual a cada ciclo;
- Ancho **de la probeta** 1,20 m;
- Altura **de la probeta** 2,50 m;
- Radiación por resistencias eléctricas;
- Aplicación del ensayo de estanqueidad al agua de lluvia antes y después del ensayo de choque térmico.

Las propuestas fueron analizadas de acuerdo con los siguientes criterios para el procedimiento:

- **Aplicabilidad:** este criterio se refiere a la aplicabilidad del ensayo en cuanto a las dimensiones mínimas y posición **de la probeta**, como también en cuanto a la posición exacta de la instrumentación en probetas ó prototipo;
- **Viabilidad:** este criterio se refiere a la ejecución del ensayo y la posibilidad de reproducción de las propuestas;
- **Fiabilidad y representabilidad de los resultados:** este criterio tiene como precepto, reconocer que las propuestas reproducen de la mejor forma la situación real a lo cual están sujetos los sistemas;
- **Idoneidad:** este criterio está asociado a la adecuación del método de ensayo a los distintos sistemas constructivos.

4. RESULTADOS

Los resultados están compilados en la Tabla 3, que presenta como cada proposición de avance al ensayo de acción de calor y choque térmico fue incorporado al ensayo realizado, alcanzó así las expectativas.

Tabla 3. Resultado de la incorporación de las propuestas para mejoría del ensayo de acción de calor y choque térmico.

Categoría	Propuestas	Aplicabilidad	Viabilidad	Fiabilidad y representabilidad de los resultados	Idoneidad
Calentamiento	Tiempo de calentamiento de acuerdo con el sistema constructivo	OK	OK	1*	1*
Enfriamiento	Mantener el agua en un embalse a $20 \pm 5^\circ\text{C}$.	OK	OK	OK	OK
	Tiempo de enfriamiento de acuerdo con el sistema constructivo	OK	OK	2*	2*
	Agua para enfriamiento siempre	OK	OK	OK	OK

	con la temperatura en el intervalo de $15 \pm 5^{\circ}\text{C}$				
	Aspersión de agua uniforme ($3\text{l/m}^2/\text{min.}$) constante y con presión sin interferencia en el sistema constructivo	OK	OK	OK	OK
	Reutilización del agua del ensayo	OK	OK	OK	OK
Ciclos	Ciclos sucesivos, sin intervalo	OK	OK	OK	OK
	Inspección visual a cada ciclo	3*	3*	3*	3*
Probeta	Ancho de la probeta 1,20 m	OK	OK	OK	OK
	Altura de la probeta 2,50 m	OK	OK	OK	OK
Equipos	Radiación por resistencias eléctricas	OK	OK	OK	OK
Estanqueidad	Aplicación del ensayo de estanqueidad al agua de lluvia antes y después del ensayo de choque térmico	OK	OK	OK	OK

1*, 2* y 3* - Nuevas propuestas de avance del ensayo

Con la experiencia acumulada en la aplicación del ensayo de acción de calor y choque térmico realizado con el equipo de panel radiante, se observó que la convección del aire caliente imprimió temperaturas muy elevadas en la parte superior del sistema de cerramiento. Con la radiación apenas en la parte inferior, la convección del aire ayudó a homogeneizar las temperaturas de la probeta, como se muestra en la Figura 1.

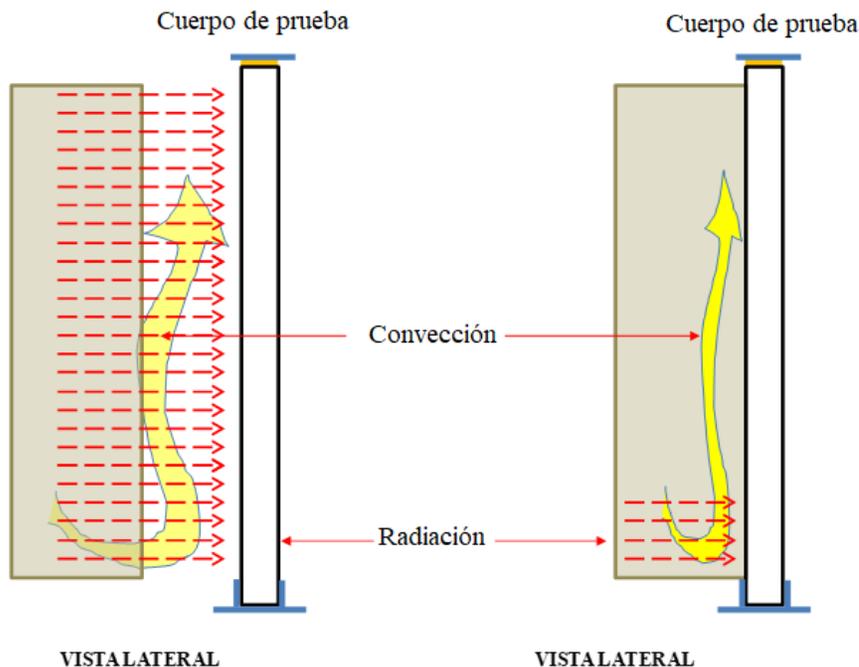


Figura 1. Ejemplos de radiación y convección para acción de calor y choque térmico en SVVE.

Se observa que, en función de las distintas composiciones de los SVVE y espesores **de la probeta**, o calentamiento y enfriamiento presentan comportamientos diferentes para alcanzar tanto a temperatura de superficie ($80 \pm 3^{\circ}\text{C}$), como a temperatura de choque térmico ($25 \pm 5^{\circ}\text{C}$), siendo

necesario el ajuste de la fuente de calor. Los chorros de agua fueron estandarizados para proporcionar una simulación de lluvia intensa, constante y uniforme, y tuvieron una presión que no ejerció la influencia en el desplazamiento horizontal (d_h) de la probeta.

El agua utilizada fue mantenida a temperatura controlada ($15^\circ \pm 5^\circ\text{C}$). La temperatura controlada de agua permitió que los chorros de agua tengan siempre la misma temperatura al alcanzar la superficie calentada, haciendo que la temperatura de la superficie calentada disminuyera más rápidamente a $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

La reutilización del agua utilizada para el enfriamiento de la probeta fue importante para la economía del ensayo. Cada ensayo fue conformado por 10 ciclos de calentamiento y enfriamiento, teniendo como estimado un consumo de 300 litros de agua/ciclo/probeta, el sistema vertical tenía $1,20 \pm 0,20\text{m}$ de ancho por $2,50\text{m}$ de altura, totalizando un consumo de 3.000 litros de agua por ensayo. La Figura 2 presenta el esquema de flujo de agua para el enfriamiento de la probeta, utilizando sistema de bombeo y filtro, utilizado para evitar la obstrucción de los picos de aspersión de agua.

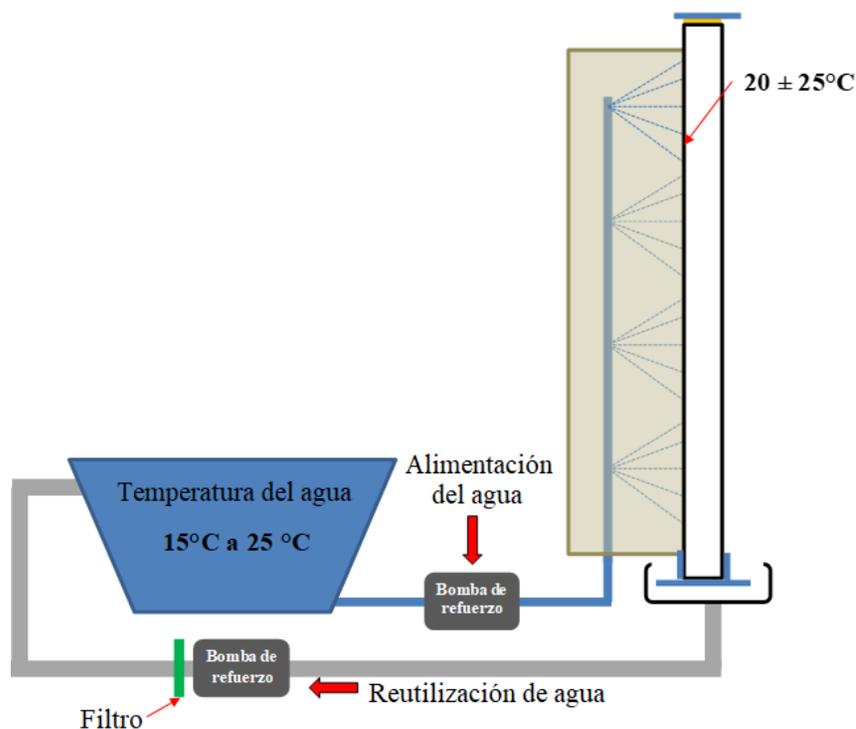


Figura 2. Dibujo esquemático del reusó del agua; dibujo esquemático de confinamiento de la probeta con auxilio de un cuadro de apoyo y la fijación del soporte del difractómetro para el ensayo de acción de calor y choque térmico en SVVE.

La inspección visual no siempre es suficiente para una evaluación precisa, en cuanto a la degradación sufrida por la probeta. Los ensayos de acción de calor y choque térmico fueron precedidos al ensayo de estanqueidad del agua de lluvia. Luego de la finalización de los 10 ciclos, fue realizado nuevamente el ensayo de estanqueidad. El ensayo de estanqueidad al agua de lluvia siguió lo establecido en la NBR 15575-4 (2013).

Se identificó si había la necesidad de ajustes e innovaciones en el procedimiento que promuevan la reproductividad de las condiciones de exposición, a fin de permitir y proporcionar resultados más fidedignos con el real comportamiento en uso de los sistemas. La Tabla 4 presenta nuevas propuestas para el ensayo de acción de calor y choque térmico.

Tabla 4. Nuevas propuestas de avance en el ensayo de acción de calor y choque térmico

Ensayo	Nuevas Propuestas
Probeta	Restringir la parte superior - representar fielmente el sistema constructivo en uso
Calentamiento	Tiempo de calentamiento 15 – 20 min SVVE ligero y flexible Tiempo de calentamiento 35 – 40 min SVVE pesado y rígido
Enfriamiento del agua	Mantener el agua enfriada a temperatura de $15 \pm 5^{\circ}\text{C}$
	Tiempo de enfriamiento 3min SVVE ligero y flexible Tiempo de enfriamiento 6 min SVVE pesado y rígido
Ciclos	Mantener ciclos sucesivos
Equipos del panel radiante y aspersión de agua	Radiación con resistencias eléctricas y lámparas ultravioleta UVA

5. CONCLUSIONES

La consolidación del concepto de desempeño, y establecimiento de requisitos claros, objetivos y bien definidos y la incorporación de ensayos para el conocimiento del potencial desempeño de los sistemas, son ejemplos de una verdadera revolución en el sector de la construcción civil, que impacta directamente en la concepción de edificaciones. Los ensayos de desempeño de edificaciones constituyen un medio rápido, preciso y confiable de predecir el comportamiento potencial en uso de SVVE y es relevante para la evaluación del desempeño de edificaciones.

La realización y los resultados obtenidos permitieron comprender mejor, que esperar como resultado en relación con el comportamiento en el uso de sistemas constructivos, innovadores o no, sometidos a temperaturas ambientales extremas y enfriamientos bruscos de temperatura. Se constató, como era esperado, que en virtud del ensayo no poseer un histórico consistente de uso y de diseminación de resultados, es bastante impreciso en la descripción del procedimiento de ensayo y en detalles del equipo.

Aunque no se hayan hecho propuestas en cuanto a la inspección visual y a los números de ciclos establecidos a los que **la probeta** será sometida, se observó la necesidad de tener criterios, parámetros y límites, para una evaluación más objetiva, evitando la subjetividad de la inspección visual.

En relación con las propuestas de avance en el método de ensayo de acción de calor y choque térmico, fue posible comprobar que son pertinentes y contribuyen significativamente para una mejor estimativa de comportamiento en el uso del SVVE, innovador o no.

De esta forma, se concluye que, las propuestas estudiadas tienen potencial para ser incorporadas al procedimiento de ensayo de acción de calor y choque térmico, promoviendo un resultado más próximo de la situación real.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Laboratorio de Ensayos y Modelos Estructurales (LEME) da UFRGS por la excelente estructura disponibilidad durante la realización de los ensayos y por la disposición de los técnicos antes, durante y después de los experimentos.

7. REFERENCIAS

ASTM International. (2012). *ASTM C 1185-8 Standard test methods for sampling and testing non-asbestos fiber-cement flat sheet, roofing and siding shingles, and clapboards*. <https://doi.org/10.1520/C1185-99>

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Edifícios Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: edifícios habitacionais – desempenho – parte 2: requisitos para os sistemas de estruturais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: edifícios habitacionais – desempenho – parte 4: requisitos para os sistemas de vedação verticais Internas e Externas – SVVIE*. Rio de Janeiro.
- Becker, R. (2001), *An Integrated Approach to the Development of Performance Test Methods and their Application to Evaluation and Design*. The RILEM Journal Materials and Structures. 34:467 – 474.
- Borges, C. A. (2012), *Desempenho Revisado*. Revista Técnica, 192:42 – 49.
- Borges, C. A. M. (2008), “*O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil*”, Masters Thesis, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.3.2008.tde-25092008-094741>
- Esquivel, J. F. T. (2009), “*Avaliação da Influência do Choque Térmico na Aderência dos Revestimentos de Argamassa*”, Doctoral Thesis, Universidade de São Paulo, p. 262.
- European Organization for Technical Approvals. (2008) *ETAG 004: Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems With Rendering*. Brussels.
- Fontenelle, J. H. (2012), “*Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental*”, Masters Thesis, Universidade de São Paulo, p. 219.
- Fontenelle, J. H. e Mitidieri Filho, C. V. (2016), “*Condições de contorno lateral dos corpos de prova submetidos ao ensaio de ação de calor e choque térmico*”. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo.
- International Organization for Standardization (2009). *ISO 8336: Fibre-cement flat sheets*. Geneva.
- Lorenzi, L. S. (2013), “*Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social Terreas*”, Doctoral Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 222.
- Mitidieri Filho, C. V. (1998), “*Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações: proposições específicas à avaliação do desempenho estrutural*”, Doctoral Thesis, Universidade de São Paulo.
- Mitidieri Filho, C. V. (2007), *Qualidade e Desempenho na Construção Civil*. In: Isaia, G. C. “*Materiais de Construção Civil e os Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*”, São Paulo, IBRACON, cap. 23, pp. 37 – 73.
- Oliveira, L. A.; Fontenelle, J. H. e Mitidieri Filho, C. V. (2014), *Durabilidade de fachadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico*. Ambiente Construído. 14(4):53- 67. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400005>
- Silva, M. A. C. (2001), “*Desafios da Aplicação Prática do Conceito de Desempenho e seu Impacto na Qualidade das construções*”. In: 4º Seminário de Patologia das Construções, São Leopoldo.
- Silva, M. A. C. (2013) “*Especificação por desempenho e os dados de caracterização de desempenho disponibilizados pelos fabricantes*”. In: Seminário: Projeto, Especificações e Controle de Execução para Atender a Norma de Desempenho, São Paulo.
- Thomaz, E. (2012) “*Tendências de Materiais, Tecnologias e Processos de Construção de Edifícios*”. In: Seminário: Tecnologia, Desempenho e Sustentabilidade na Construção Civil, Manaus.
- Thomaz, E. (2013) “*O que é preciso fazer para atender a norma quanto ao desempenho de pisos*”. In: Seminário: Projeto, Especificações e Controle de Execução para Atender a Norma de Desempenho, São Paulo.

Las manifestaciones patológicas y los riesgos de los protectores de aparatos de aire acondicionado en edificaciones

W. W. Silva^{1*} , E. C. B. Monteiro¹ 

*Autor de Contacto: wildsonws@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.410>

Recepción: 25/04/2019 | Aceptación: 22/07/2019 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Dado el gran número de derrumbes parciales o totales en los edificios, este estudio identifica las manifestaciones patológicas y los riesgos de los soportes de los aparatos de aire acondicionado de hormigón armado en los edificios, los datos fueron recogidos por el software 3D y consolidados en el terreno. De los 61 edificios analizados, el 48% son de tipo ventana, que, en una situación de degradación y caída, pueden llegar al suelo con un impacto del orden de toneladas. En las regiones costeras, se añaden los efectos acelerados de la corrosión de las armaduras, como la alta humedad, la contaminación por vehículos de motor y la región marina. Se concluye que estos soportes no tienen diseños estructurales adecuados, lo que, unido a la baja calidad y a los efectos aceleradores de la corrosión de las armaduras, hace que no sean capaces de recuperarse.

Palabras clave: patología; corrosión; aire acondicionado; concreto, riesgos.

Citar como: Silva, W. W., Monteiro, E. C. B. (2020), “*Las manifestaciones patológicas y los riesgos de los protectores de aparatos de aire acondicionado en edificaciones*”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 377 – 393, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.410>

¹ Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

Editor asociado responsable de este artículo: Andrés Antonio Torres Acosta

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Wildson Wellington Silva contribuyó a la actividad de diseñar el manuscrito, recolectar datos, analizar e interpretar los datos, revisión crítica del contenido y discutir los resultados, el autor B contribuyó a la actividad de diseño del manuscrito, análisis e interpretación de los datos, revisión crítica del contenido y discusión de los resultados.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

The pathological manifestations and risks of the protectors of air conditioners in buildings

ABSTRACT

Faced with the large number of partial or total collapses in buildings, this study has the identification of the pathological manifestations and the risks of the supports for air conditioners of reinforced concrete in the buildings, the data were collected by 3D software and consolidated in the field. Of the 61 buildings analyzed, 48% are of the window model, which in a situation of degradation and fall, can reach the ground with an impact of the order of tons. In coastal regions, we add the accelerating effects of the corrosion of the reinforcement, such as high humidity, pollution by automotive vehicles and marine region. It is concluded that these supports do not have adequate structural designs, allied to the low quality and accelerating effects of the corrosion of the armature, rendering them not recoverable.

Keywords: pathology; corrosion; air conditioning; concrete; risks.

As manifestações patológicas e os riscos dos protetores de aparelhos de ar condicionado em edificações

RESUMO

Diante do grande número de colapsos parciais ou totais em edificações, tem-se neste estudo a identificação das manifestações patológicas e os riscos dos suportes para aparelhos de ar condicionado de concreto armado nas edificações, os dados foram coletados por software 3D e consolidados em campo. Das 61 edificações analisadas, 48% são do modelo tipo janela, que em uma situação de degradação e queda, podem chegar ao solo com um impacto da ordem de toneladas. Em regiões litorâneas, somam-se os efeitos aceleradores da corrosão da armadura, como umidade elevada, poluição por veículos automotores e região marinha. Conclui-se que esses suportes não possuem projetos estruturais adequados, aliados a baixa qualidade e efeitos aceleradores da corrosão da armadura, tornando-os não passíveis de recuperação.

Palavras-chave: patologia; corrosão; ar condicionado; concreto, riscos.

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos en materia de climatización han favorecido la eficiencia energética, asociada a la mejora de las normas técnicas de diseño y construcción de edificios y a la constante necesidad de sistemas de refrigeración de menor consumo energético (Larsena, et.al., 2015) y mayor conciencia ambiental (Perinia, et.al., 2017).

Actualmente existe un pasivo de sistemas de refrigeración que no han demostrado ser eficientes a lo largo de los años, debido a que fueron descuidados por formar parte de las etapas finales de la construcción, donde el flujo de caja financiera de los constructores, ya no implican un gasto excesivo en esta etapa de la entrega de los edificios, por lo tanto, la adopción de materiales de baja calidad, a pesar de ser estructuras expuestas y externas, como es el caso de las fachadas.

Estos soportes pueden ser de varios modelos y materiales, que pueden ser de hormigón armado, muy comunes en Brasil, metálicos como en el caso de los EE.UU. (Estados Unidos de América), Reino Unido y España, no restringiéndose sólo en lugares donde no hay un control urbano adecuado, como en los barrios pobres, en países de África, Asia y América Latina (Desai y Potter, 2014), sino en los barrios de clase media e incluso de alto nivel, se puede entonces concluir que forma parte de un escenario global muy extenso.

En los servicios de mantenimiento de edificios es muy común el intercambio de apoyos de hormigón armado, debido al estado de deterioro de la estructura de soporte o por incidencias ya ocurridas en la zona común del edificio, lo que plantea la necesidad de estudiar el tema. Si la presencia de manifestaciones patológicas es tan intensa, junto con el agravante de que estos apoyos se encuentran en un entorno externo y a gran altura, ¿cómo serían los impactos de estos apoyos y/o equipos en el suelo? ¿Cuál es el grado de riesgo para las personas, los vehículos y las estructuras afectadas?

Durante la fase de investigación de las referencias bibliográficas, no fue posible identificar estudios similares, relacionados con los soportes para acondicionadores de aire en edificios, que pudieran servir de base para este trabajo, lo que amplió aún más el interés por el tema, pero se utilizaron todos los aspectos inherentes a las manifestaciones patológicas, las condiciones ambientales y climáticas, las estadísticas y las técnicas.

Los mecanismos de corrosión no son simples y nuevos, dado el abanico de posibilidades para su ocurrencia, según (Johnson, 1965) hay un efecto de expansión en la masa de hormigón, provocando grietas y la consiguiente fragmentación del hormigón, la corrosión está predominantemente ligada al proceso electroquímico, el uso del medio húmedo, agravado por el medio agresivo, las variaciones en el espesor del recubrimiento de hormigón, como se comenta (Cánovas, 1984), los errores de diseño, así como la adopción de materiales inadecuados, son procedimientos que favorecen en gran medida la aparición de manifestaciones patológicas. En la ABNT NBR 6118:2014, esto define como durabilidad la capacidad de la estructura de resistir a los requisitos de diseño, preservando la seguridad y la estabilidad, mientras dure su vida útil, un punto muy importante, ya que incluso las estructuras no son eternamente duraderas y necesitan ser constantemente revisadas y reparadas.

De acuerdo con la norma ABNT NBR 6118: 2014, con el fin de tener una mayor vida útil, es necesario cumplir con algunas directrices para retrasar los mecanismos de deterioro del hormigón, que se producen por lixiviación, expansión por sulfatos, reacción álcali-agregado y en cuanto al deterioro de la armadura con respecto a la carbonatación, la acción de los cloruros y los mecanismos de la propia estructura. Para estas condiciones, existe una relación en cuanto a las clases de agresividad ambiental (CAA), que fueron clasificadas según las condiciones de la región y del microclima, de acuerdo con (Bertolini, 2010) y (Almeida y Sales, 2018), hay algunos aspectos relacionados a los tipos de atmósfera y exposición y fue analizada en tres partes principales: Humedad relativa del aire crítico (más del 65% y hasta el 85%); Atmósfera marina, ataque de iones

de cloruro y sulfatos (proximidad al agua de mar); grandes núcleos de población (agentes agresivos), además se estudió la influencia de los vientos sobre un edificio, tomados como ejemplo, porque algunos aspectos inherentes a la corrosión de la armadura están influenciados por la acción de la lluvia y el viento.

Este estudio tiene como objetivo identificar los modelos de soportes de los acondicionadores de aire en los edificios investigados, los tipos de manifestaciones patológicas más frecuentes, además de los factores de aceleración, los riesgos que representan para las personas, los coches y las estructuras, en la situación de caída parcial o total del soporte y/o del propio acondicionador de aire y si existe una posibilidad concreta de recuperarlos.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación es un Estudio de Caso, delimitado en la ciudad de Recife, capital del estado de Pernambuco, Brasil, con las coordenadas geográficas de Latitud: -8.05428, Longitud: -34.8813, que tiene un área territorial de 218,843 km² y una población estimada de 1.637.834 habitantes (IBGE, 2018), con una densidad de población de 7,039.64 hab/km² e IDH - Índice de Desarrollo Humano de 0.772 (IBGE, 2010), PIB per cápita de US\$ 7,916.29 (IBGE, 2016), clima tropical, cálido y húmedo, con 3 meses secos y temperatura media superior a 18 °C en todos los meses del año (IBGE, 2002).

Se adoptó la región de la zona norte de Recife, entre los barrios de Parnamirim, Tamarineira y Casa Amarela, de acuerdo con las líneas divisorias en amarillo, se definió un círculo azul de radio = 300 m de color verde, utilizando el programa de computación Google Earth Pro, como se ve en la Figura 1.

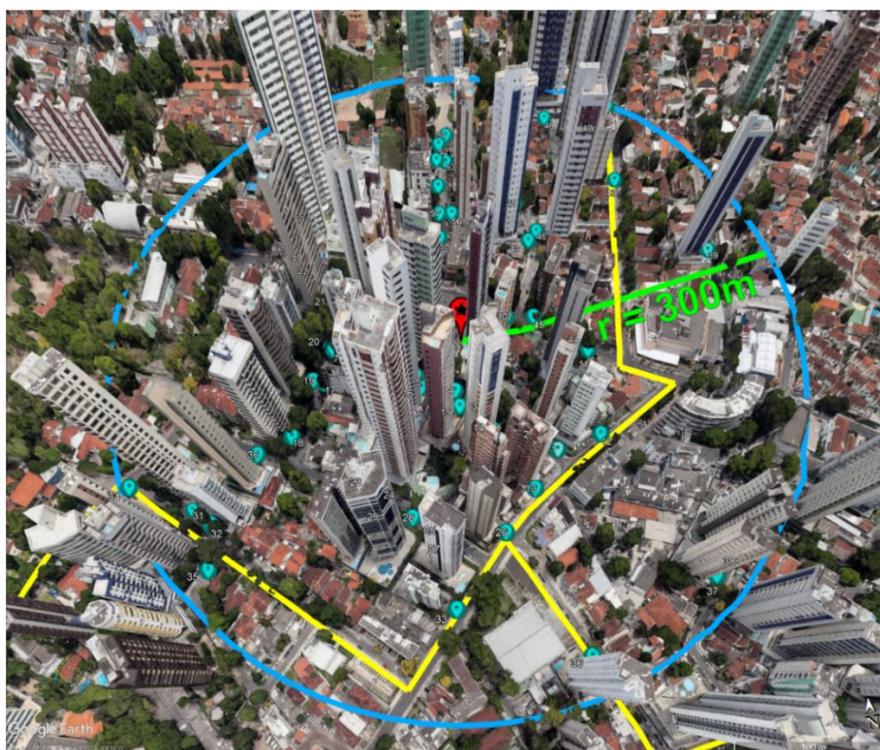


Figura 1. Ubicación de los edificios inspeccionados

Inicialmente se creó una hoja de cálculo MS-Excel, con la información a recopilar: nombre y dirección del edificio, coordenadas geográficas, elevación entre la base y la parte superior del edificio, número de plantas, altura estimada, tipo de soporte para el aire acondicionado, estado de

los soportes (inspección), en cuanto a las manifestaciones patológicas (malo, regular y bueno) y el modelo de la caja, ya sea abierta o cerrada y si ya han sido sustituidos.

Luego se definió incluir sólo los edificios de más de 3 pisos, porque las casas y los edificios bajos son más difíciles de verificar, debido a las paredes altas, sin incluir los edificios públicos, que fueron representados por puntos y una numeración en azul, con el fin de facilitar la catalogación de la información, estas muestras fueron recogidas durante un período de 4 meses por el ordenador y después de esta fase, se hizo una visita de campo para verificar algunos datos no aclarados durante la primera fase de la recogida y, en consecuencia, concluir la realización de la hoja de cálculo con los datos de las manifestaciones patológicas identificadas y si después de la construcción del edificio ya había sustituciones.

3. ANÁLISIS DE LOS EDIFICIOS

3.1. Tipos de soportes para los acondicionadores de aire

Tras la recogida de información, fue posible identificar 3 tipos de sistemas de apoyo para los aparatos de refrigeración, que son: caja protectora de hormigón armado (tipo ventana), otros apoyados en las ventanas o vanos (adoptados como modelo escondido) y los que utilizan estructuras ya incorporadas en el edificio (modelo dividido), alcanzando así un total de 61 edificios analizados, como se ve en la Figura 2.

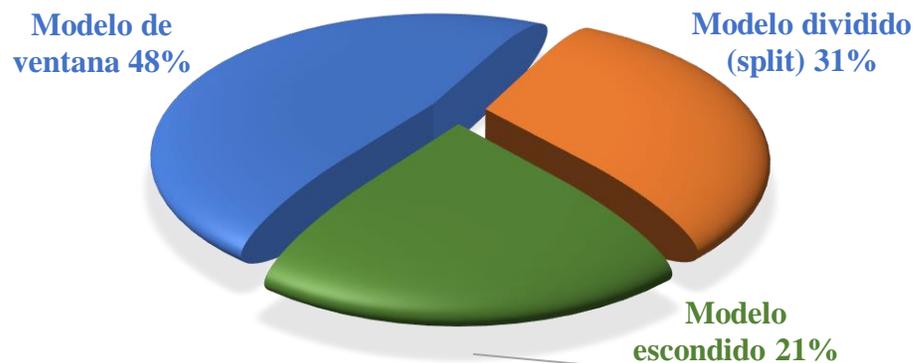


Figura 2. Sistemas de soportes para aparatos de refrigeración de edificios

Así, se encontró que el 48% de los edificios utilizan modelos de tipo ventana, el 21% con el modelo oculto y, finalmente, con sólo el 31% de los modelos que integran las estructuras de los edificios (aparatos split), éstos por cierto provienen de proyectos más recientes.

Lo que se puede destacar de los datos recogidos, es la existencia de dos modelos de protectores de hormigón armado del tipo ventana, de los cuales, de un total de 29, tenemos 20 para el modelo abierto y 9 para el modelo cerrado. Por sus características y dimensiones, se puede considerar el modelo abierto más frágil, es decir, casi el 70% de los edificios que disponen de protectores de hormigón armado tipo ventana son de diseño sencillo y, por lo tanto, generan el mayor riesgo de desgaste prematuro, en las Figuras 3 y 4 se muestran los modelos descritos en este párrafo.

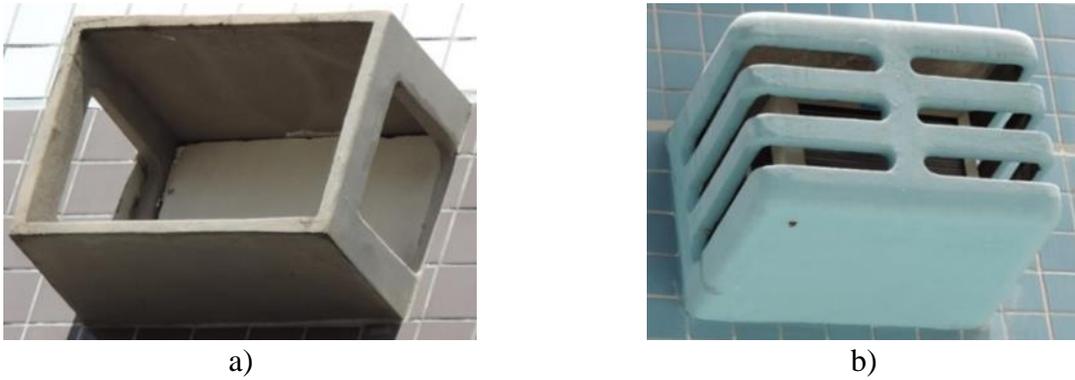


Figura 3. Soporte de hormigón armado, tipo ventana: a) modelo abierto; b) modelo cerrado

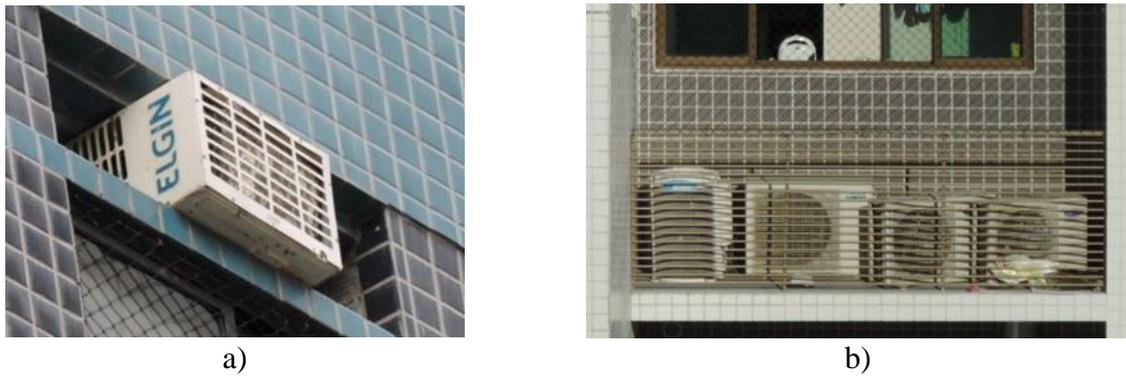


Figura 4. Otros modelos de soporte: c) modelo escondido; d) modelo para *split*

3.2. Diseño estructural de los soportes de las ventanas

A continuación se muestra una representación esquemática de los modelos abierto y cerrado (Figura 5).

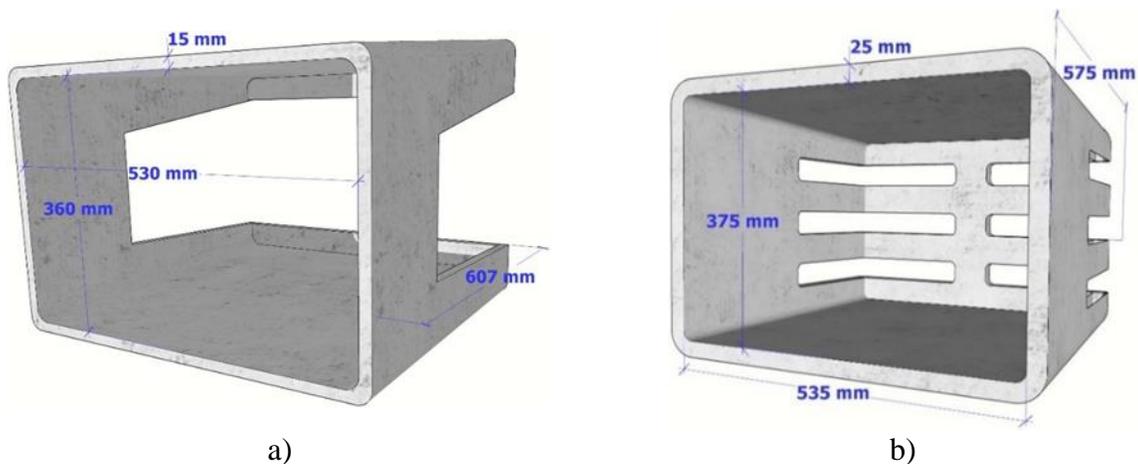


Figura 5. Estructura de los modelos de ventanas: a) abierta; b) cerrada

Debido a que las dimensiones del modelo abierto son bastante simples, la fabricación se hace más fácil, pero la fragilidad del modelo estructural se hace visible.

Hay el detalle de un corte de este modelo, donde se identificará la posición de la armadura, en la pared del soporte, que en este caso utiliza el alambre CA-60 de 4.2 mm, esta consideración, como se expone en la ABNT NBR 7480:2007. De acuerdo con (Oswaldo y Helene, 2001), el acero CA-

60 tiene una mayor resistencia a la corrosión que el acero CA-50, debido a su mayor contenido de carbono y manganeso, asociado a las menores tensiones internas de la estructura, detalle del corte en la figura 6.

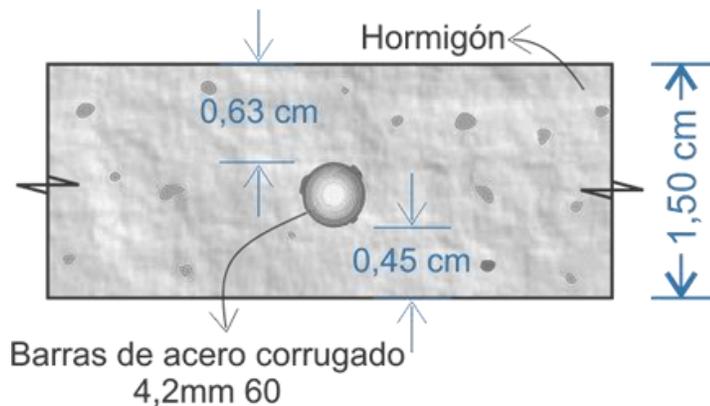


Figura 6. Detalle de la armadura del modelo de ventana, abierto

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Humedad relativa / Condiciones atmosféricas

Para este análisis fue recogido a través del INMET (en português, Instituto Nacional de Meteorologia) por la Normal Climatológica de Brasil 1981-2010 (INMET, 2018) y se separó la ciudad de Recife en este período, con base en el Mapa de Humedad Relativa del Aire Compensada y las Planillas de Humedad Relativa del Aire Compensada dos veces al mes y una vez al año, se encontró que las humedades, con base en el promedio, variaron dentro del rango de 65% a 85% a lo largo del año, indicando una humedad dentro de las normas que aceleran los procesos de corrosión de las armaduras, como se ve en la figura 7.

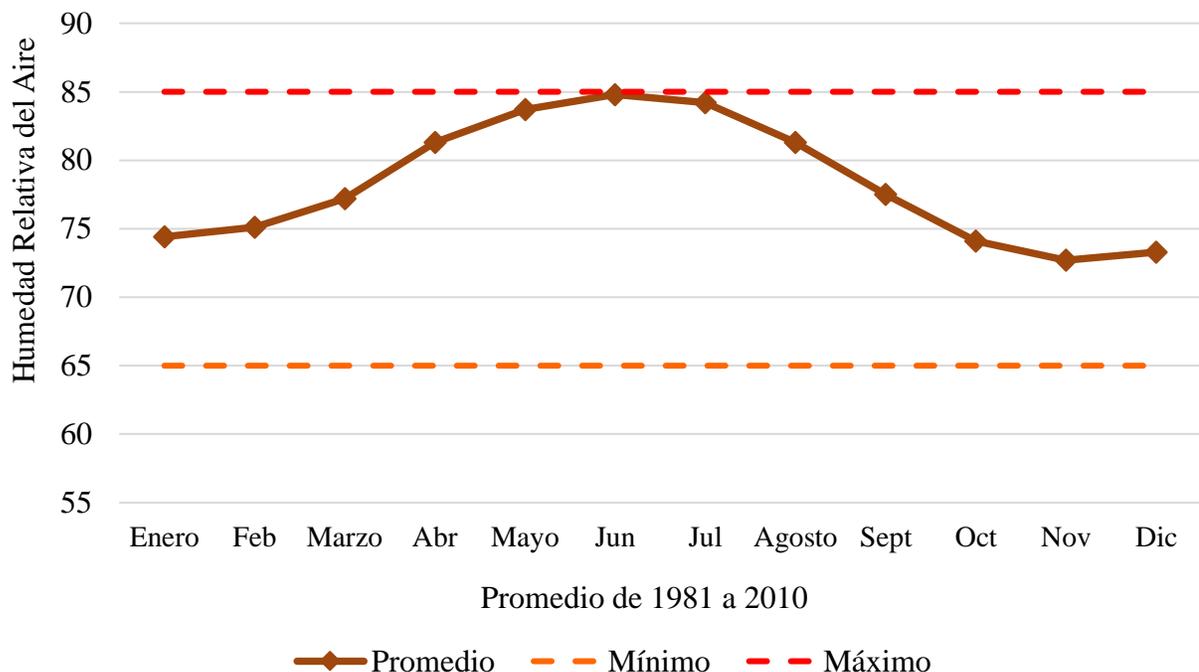


Figura 7. Variación de la humedad relativa del aire (desde 1981 hasta 2010), fuente: INMET

De acuerdo con las Regulaciones Climatológicas Brasileñas 1981-2010 (INMET, 2018), con base en el Mapa de la Dirección del Viento Predominante (puntos cardinales y colaterales), se tiene la dirección del viento predominante para la ciudad de Recife, en la dirección SE (sudeste) en prácticamente todos los meses del año, con excepción del mes de noviembre, en la dirección E (este) y julio para la dirección S (sur).

Tomando como ejemplo un edificio residencial, se utilizó la aplicación GPS para teléfonos inteligentes Commander Compass Go 3.9.9, a través del girocompás y la dirección de la coordenada geográfica insertada en el mapa de Google, fue posible visualizar la dirección de los vientos en las fachadas, a lo largo del año, como se observa en la figura 8a.

Este edificio cuenta con los protectores de hormigón armado del modelo cerrado, en todas las fachadas, pero se puede observar que en las fachadas Norte (N) y Oeste (O), estas estructuras tienden a mostrar una mayor degradación, como se observa en la figura 8b.

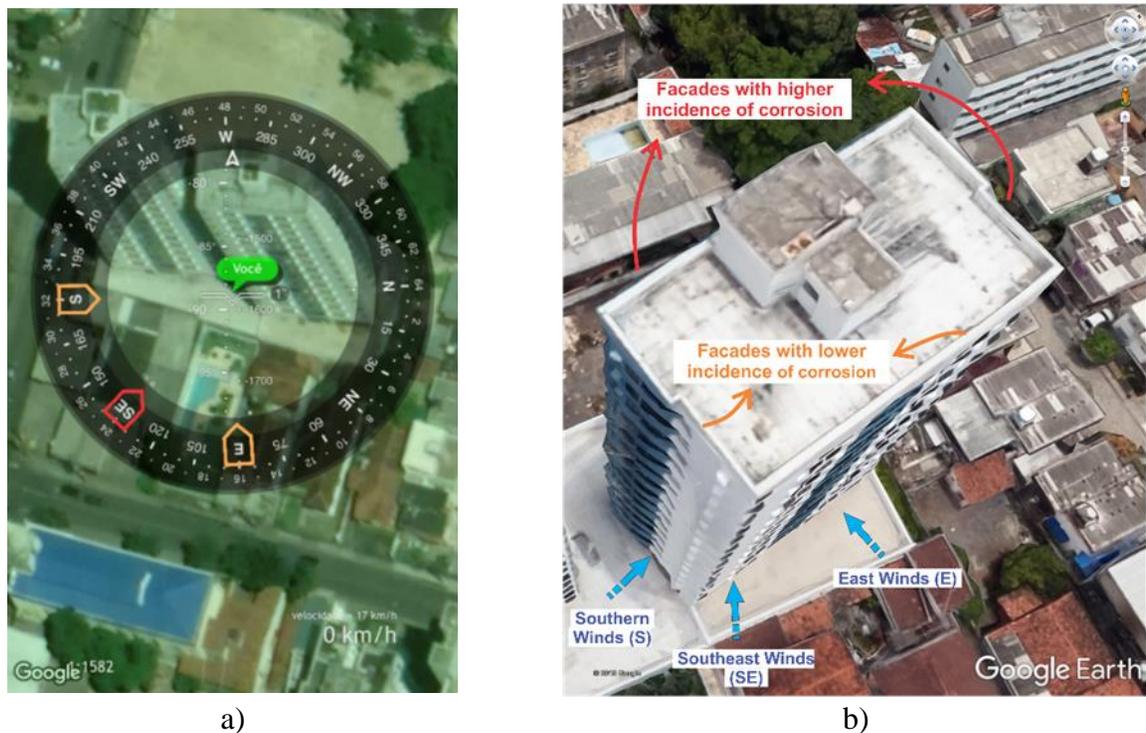


Figura 8. Dirección del viento en el edificio: a) dirección del viento; b) vientos de construcción

Algunos estudios indican que la velocidad del viento, al ser superior a 3m/s, puede distribuir iones de cloruro en regiones más alejadas de la costa, estando también influenciado por la altitud, con una mayor concentración de iones de cloruro en altitudes más bajas, hasta 10m, pero en algunas regiones, como Hawaii, en los EE.UU., puede llegar hasta los 30m, por encima de los vientos en el edificio. A partir de estas altitudes, hay una drástica reducción de estos materiales salinos, (Meira, 2017), incluso en lugares donde rompen las olas del mar, se identificó que el viento presenta un factor más decisivo en el transporte de cloruros en el hormigón, que la altitud, (Balestra, 2019) y que es mayor hasta 100m de distancia de la costa, (Moreno, et.al., 2018).

Con base en los datos del BDMEP (Banco de Datos Meteorológicos para Ensino e Pesquisa), Velocidad Media del Viento) (mps) del INMET (INMET, 2018), se puede verificar que a lo largo de 5 años, la velocidad del viento en Recife no superó los 2,75m/s, por lo tanto, un lugar de vientos más suaves (Figura 9).

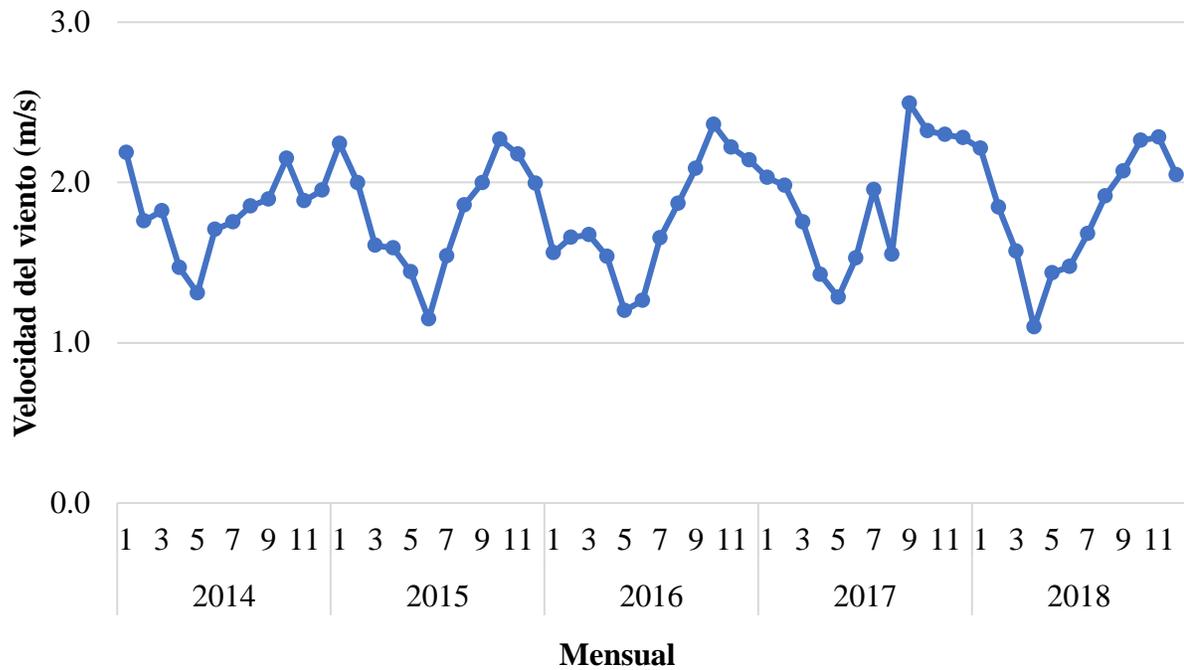


Figura 9. Media de velocidad del viento, fuente: INMET

4.2. *Atmósfera marina*

Debido a que Recife se encuentra en una región costera, cercana al mar, se demostró la distancia entre la región investigada y el estallido de las olas del mar, lo que puede indicar un ataque de iones de cloruro (neblina de mar), Figura 10.

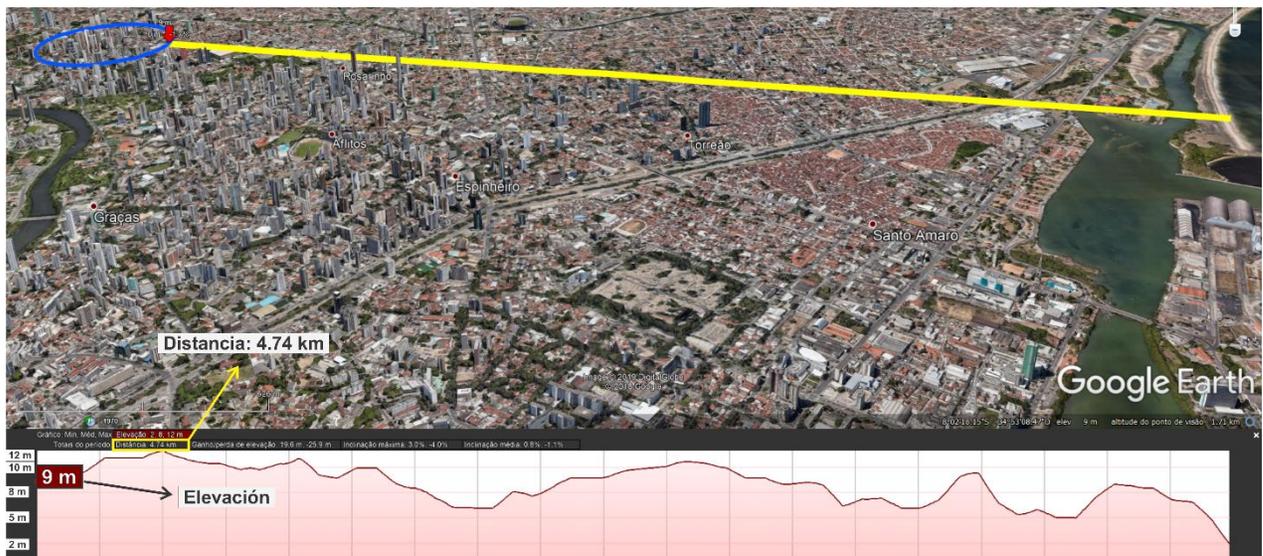


Figura 10. Distancia al mar de la región analizada

Como se puede observar, la distancia desde el estallido de las olas del mar hasta el punto en estudio, figura alrededor de 4.74 km, según (Pontes, 2006), después de analizar el litoral del barrio de Boa Viagem en Recife, PE, con mediciones por el método de aparatos de navegación húmeda para distancias de 7 m a 320 m de la costa, donde se encontró a través de un modelo adoptado, que a partir de 400 m hay una reducción significativa de la deposición de cloruro y se reduce a valores insignificantes a 700 m.

En otro estudio realizado por (Luna, 2008), sobre el Mapeo de la Corrosividad Atmosférica del Estado de Ceará, se concluyó que esta influencia alcanza distancias de hasta 30 km de la costa, es decir, hay lugares con mayor o menor ataque de iones de cloruros que pueden ser muy agresivos y con morfologías diversas (Moreno, et.al., 2015).

En un análisis de campo, realizado por (Meira et.al., 2014), se demostró que el aumento de la porosidad del hormigón, ocasionado por la relación a/c, causa una disminución en la cantidad de iones de cloruro dentro del hormigón armado.

4.3. Grandes centros de población (contaminación por agentes agresivos)

La ciudad de Recife concentra una alta densidad poblacional, según el Censo Demográfico 2010 del IBGE (Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística) (IBGE, 2010), se tiene una densidad superior a 500 habitantes por km² (figura 11). Con esto tenemos uno de los problemas de las metrópolis del mundo, la contaminación por partículas finas PM_{2,5}, formadas por partículas de material sólido o líquido suspendidas en el aire, (Ventura, et.al., 2017).

Esto se mostró dentro de los parámetros apropiados de la OMS - Organización Mundial de la Salud, que sería de hasta 400 ppm de dióxido de carbono en el medio ambiente abierto, probablemente porque está relacionado con el sistema meteorológico de la costa, favoreciendo la dispersión de estas partículas por el aire, de acuerdo con (Santos, et.al., 2014), teniendo sólo una mayor concentración en la temporada de lluvias.

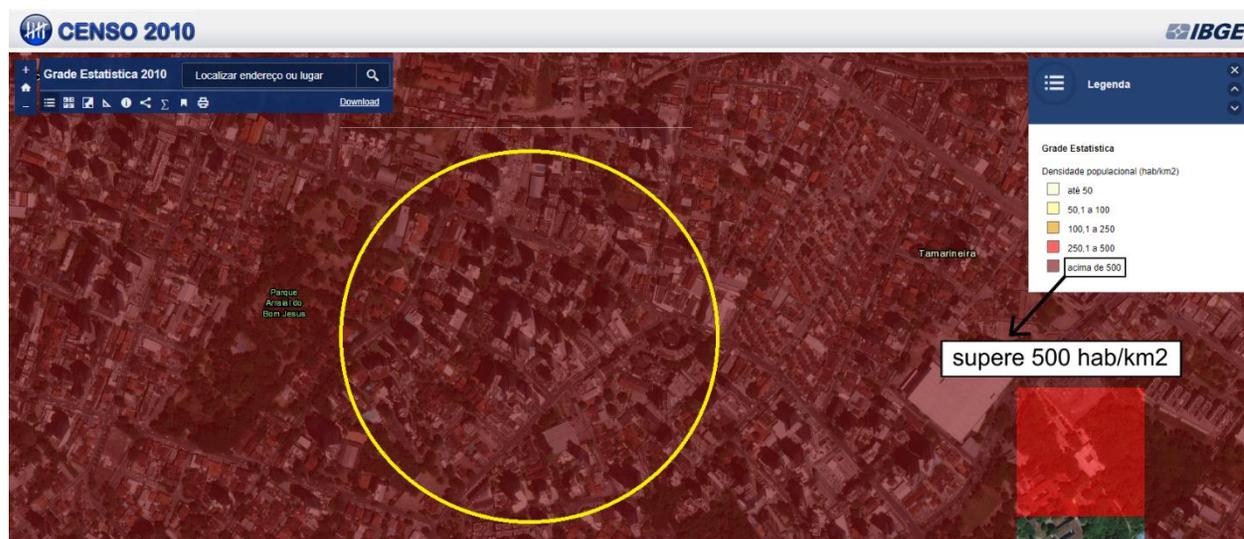


Figura 11. Intensidad de la urbanización, densidad de población en Recife, PE

5. IDENTIFICACIÓN DE LAS MANIFESTACIONES PATOLÓGICAS

Se encontró preliminarmente, durante una visita a los proveedores de artefactos de cemento, que las trazas de concreto fueron realizadas empíricamente, por lo que no hay ningún control de calidad sobre la relación agua-cemento y, por consiguiente, influye en el volumen total de huecos y las dimensiones de los poros, facilitando el transporte de agua, iones de cloruro y CO₂ en el concreto. Se realizó una visita de campo para identificar las manifestaciones patológicas más recurrentes, a través de un relevamiento y registro a través de imágenes y datos.

En el primer análisis, tenemos la visualización de las grietas y la corrosión de la armadura, posiblemente causadas por ataques de carbonatación o de cloruro (Figura 12) así como el estado más avanzado de degradación, cuando la estructura se destacó, debido a la expansión causada por el aumento de volumen de la armadura y la consiguiente expulsión del hormigón por la fuerza de tracción, (Choi, et.al, 2014). (figura 13)



Figura 12. Corrosión de la armadura en el modelo de ventana: a) fisuras; b) desprendimiento de hormigón



Figura 13. Ruptura parcial en el modelo de tipo de ventana, abierto: a) sin losa de fondo; b) sin losa superior

Otro punto a destacar y no menos agravante es el uso inadecuado de estos soportes, situaciones creadas por los propios usuarios o técnicos de refrigeración, que por desconocimiento o incapacidad, aprovechan estos soportes para hacer modificaciones con la adición de otro sistema de refrigeración, que generan esfuerzos desproporcionados, favoreciendo las infiltraciones en la fachada, sobrecargando los soportes existentes, ya en proceso de intensa degradación, a veces, como se ve en la Figura 14.

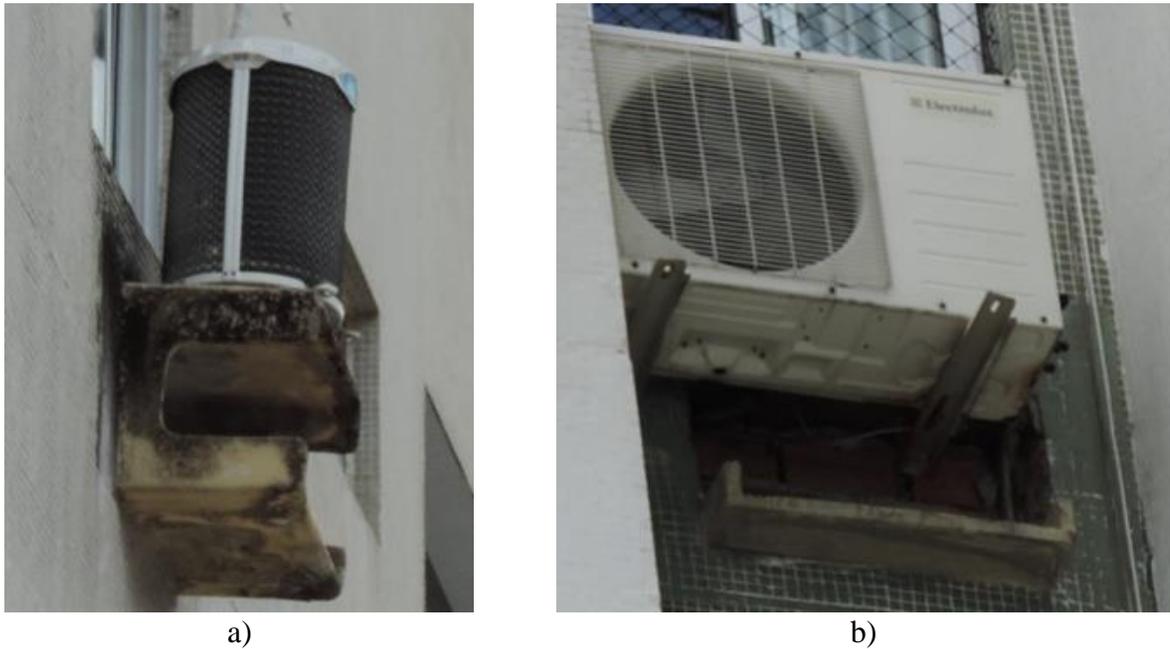


Figura 14. Uso inapropiado: a) esfuerzos desmesurados; b) infiltración en la fachada

Para los edificios con soportes de hormigón armado, se identificaron visualmente las principales manifestaciones patológicas en el terreno, tales como: moho, eflorescencia, corrosión de las armaduras y desprendimiento del hormigón, en la figura 15, de un total de 29 edificios inspeccionados, 11 tenían un historial de sustitución de estos soportes, de los cuales 9 ya presentaban recurrencia de algunos fenómenos patológicos, entre ellos el desprendimiento del hormigón.

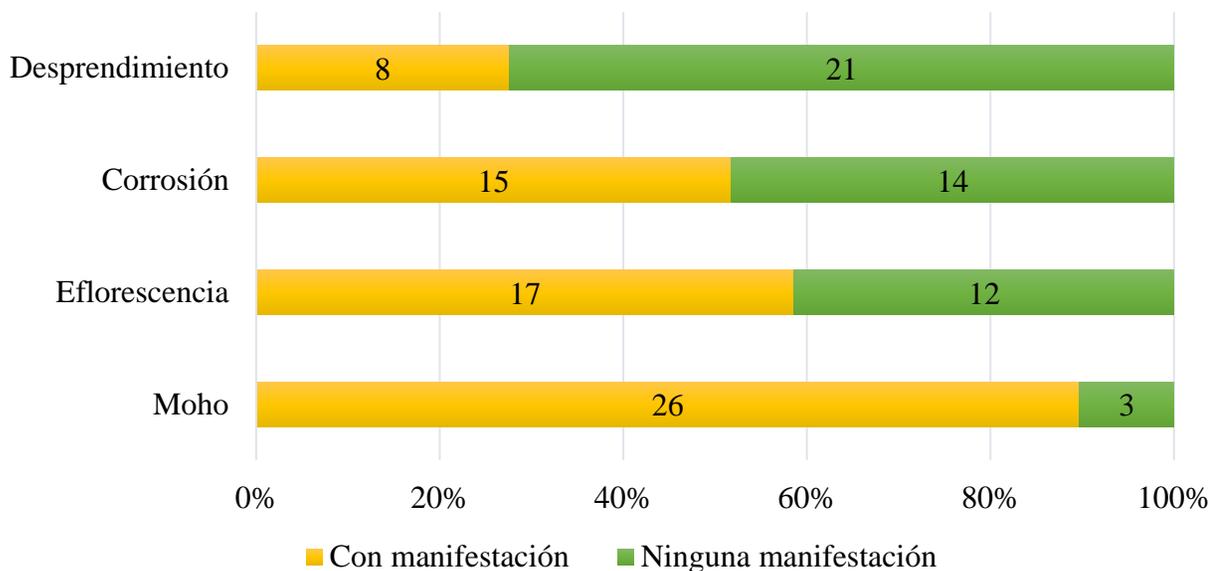


Figura 15. Manifestaciones patológicas de los soportes de hormigón armado

Al analizar los modelos de tipo cerrado, no es fácil identificar su estado de degradación desde el exterior de las fachadas, ya que las manifestaciones patológicas tienden a ser más propicias en su cara interna, dejando un margen de duda en cuanto a su condición real.

6. EVALUACIÓN DE RIESGO

Después de todos los agravantes que aceleran las manifestaciones patológicas, se analizaron las cuestiones inherentes al riesgo de este tipo de protector, ya que, ante la fragilidad generada por las degradaciones, las mismas al desprenderse de la fachada (total o parcialmente), pueden causar un impacto altamente destructivo en el suelo.

Aprovechando el cálculo demostrado por (Silveira, 2011), se adoptó para un objeto de 1kg, considerando la rotura parcial de un soporte y otro con un peso estimado de 25kg para uno completo, en una situación de desprendimiento de las fachadas de los edificios investigados y sus respectivas alturas.

Adoptando la ecuación (1):

$$F = \frac{M \cdot g \cdot H}{D} \quad (1)$$

Donde: F - resistencia; M - masa corporal; G - aceleración de la gravedad; H - altura; D - dureza del suelo de hormigón.

Para ello tenemos en la Figura 16, la información para el objeto de 1kg en azul y para el objeto de 25kg en naranja.

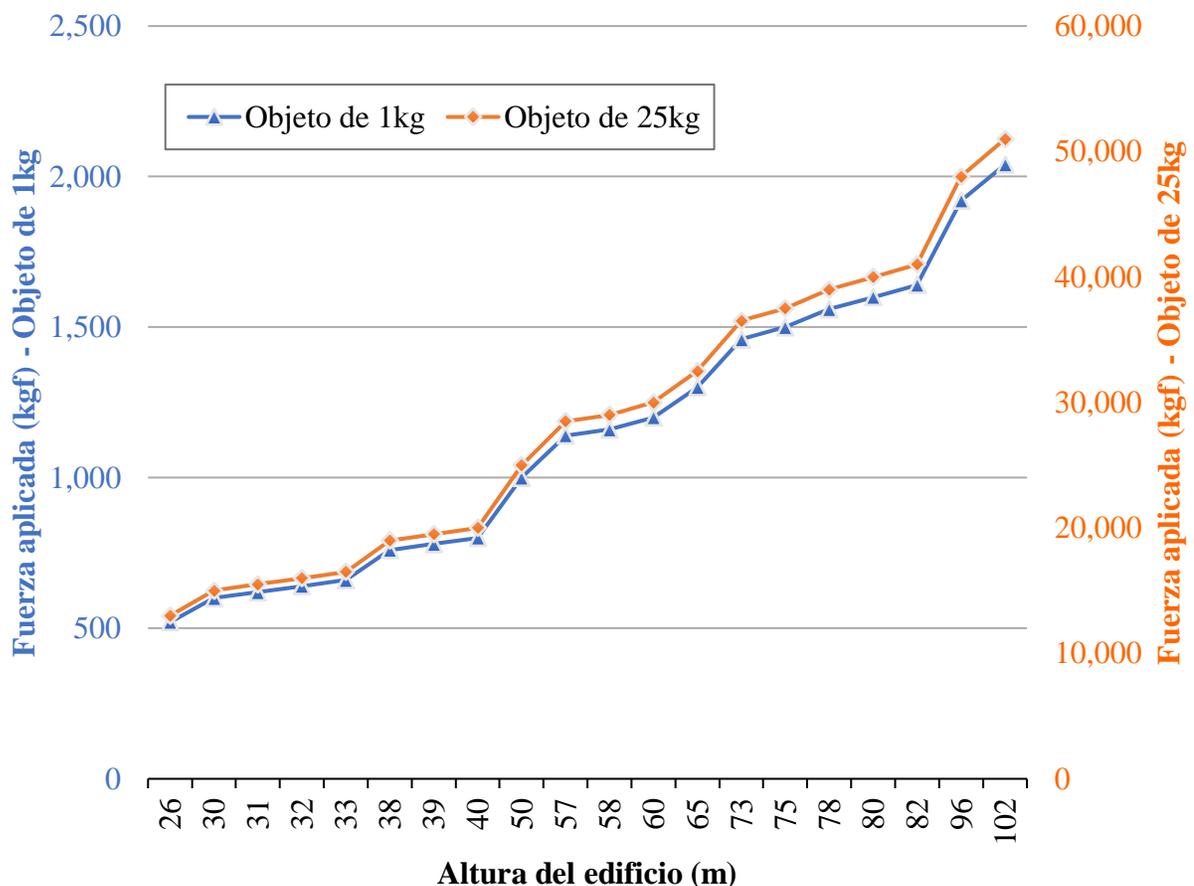


Figura 16. Fuerza aplicada por el objeto en contacto con el suelo

7. RECUPERACIÓN

Este análisis tiene como objetivo verificar la viabilidad de la recuperación de estos soportes, con el fin de aumentar su vida útil, principalmente relacionada con los casos de corrosión de la armadura, ya que estos tienen un mayor poder destructivo, sin subestimar las otras manifestaciones patológicas de: moho, crecimiento de la vegetación, eflorescencia, con base en la premisa de que no se gastarán recursos, sin una justificación más robusta, es decir, no debe haber ningún mantenimiento de la fachada sólo para la limpieza y pintura de estos soportes.

Para que la recuperación se realice de forma correcta, es necesario retirar el hormigón que rodea a la armadura (Souza y Ripper, 1998). Además de la armadura se consideran espesores de 2 cm, con el fin de garantizar la total eliminación del hormigón degradado y restaurar las barras de la armadura a la condición alcalina, de forma que se pueda realizar la limpieza y posterior aplicación de la grava.

Es notable que el espesor de la pared del cajón modelo abierto impide esta ejecución, ya que es de sólo 1,5 cm de espesor, dejando inviable esta posibilidad de recuperación para el cajón modelo cerrado, aunque las dimensiones son mayores, tampoco permiten una recuperación adecuada, incluso adoptando la condición de retirar sólo 1 cm del hormigón (sin cumplir mínimamente las normas y recomendaciones y con dificultad de ejecución), la posibilidad de grietas y roturas de la parte superior son muy grandes, porque la propia estructura ya está comprometida, es decir, en el caso de este modelo, se puede considerar la posibilidad de recuperación también inviable, según la figura 17.

Cabe mencionar, que en el mercado existen modelos con espesores mucho más robustos de 4,5 cm a 6 cm de espesor de pared, teniendo consecuentemente un control más riguroso del hormigón, estos podrían estar cumpliendo las recomendaciones para una mayor durabilidad.

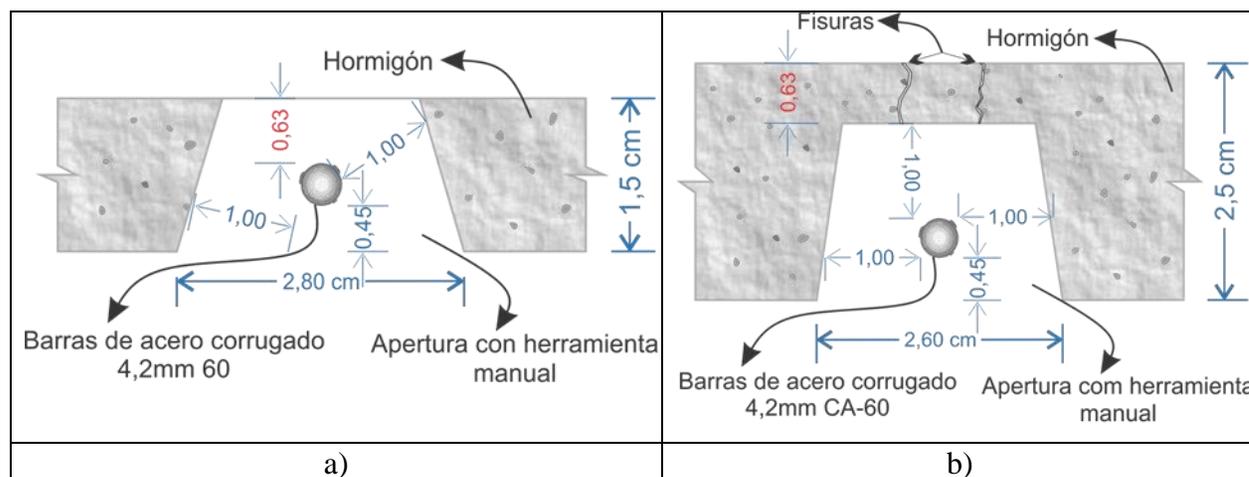


Figura 17. Detalle de la posible recuperación: a) modelo abierto; b) modelo cerrado

8. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta lo observado, se entiende que la cantidad de edificios con soportes de hormigón armado es elevada, alrededor del 50%, y que presentan manifestaciones patológicas en casi su totalidad.

Algunos factores resultaron ser más impactantes en cuanto a los aspectos de degradación, como la baja calidad del hormigón, la alta humedad a lo largo del año y la baja cobertura del hormigón, favoreciendo la aceleración de la carbonatación, en el caso del dióxido de carbono, resultó estar dentro de los estándares aceptables en un ambiente abierto.

Aunque el ataque del ion de cloruro fue bastante agresivo, resultó ser no contributivo, ya que la distancia al mar era superior a 100 m y los vientos eran inferiores a 3 m/s.

Las manifestaciones patológicas más encontradas fueron: moho, eflorescencia, corrosión de la armadura y desprendimiento del hormigón, respectivamente.

Se han identificado sustituciones de soportes de hormigón armado en el 38% de los edificios que utilizan este modelo y que en la encuesta, el 27% muestran signos de desprendimiento de hormigón, este es un factor decisivo, ya que el impacto de los objetos a gran altura puede impactar en el suelo en el orden de toneladas-fuerza.

En cuanto a la posibilidad de recuperación, se encontró que los soportes no ofrecen las condiciones mínimas de reparación aceptables, ya que no tienen sus propias dimensiones para tal procedimiento.

9. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó con el apoyo del CAPES (en portugués, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) - Código de Financiación 001.

10. REFERENCIAS

Almeida, F. C. R., Sales A. (2018), *Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto*. In: Ribeiro D. V. et. al. “*Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*”. 2. ed. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação*. Rio de Janeiro, Brasil.

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

Balestra, C. E. T., et.al. (2019), “*Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones*”. *Construction and Building Materials* 206:140–150. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.067>

Bertolini, L. (2010), “*Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção*”. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

Fernández Cánovas, M. (1984), “*Patología y terapéutica del hormigón armado*”. Editorial Dossat, Madrid, España.

Choi, Y. S., et.al. (2014), “*Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens*”. *Construction and Building Materials* 54:180–189. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.065>

Meira, G. R., et.al. (2014), “*Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone*”. *Construction and Building Materials* 55:289–298. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.052>

Meira, G. R., et.al. (2017), “*Vertical distribution of marine aerosol salinity in a Brazilian coastal area – The influence of wind speed and the impact on chloride accumulation into concrete*”. *Construction and Building Materials* 135:287–296. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.181>

Moreno, J. D., et.al. (2015), “*Determining corrosion levels in the reinforcement rebars of buildings in coastal areas. A case study in the Mediterranean coastline*”. *Building Engineering* 15:109–121. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.059>

Moreno, J. D., et.al. (2018), “*Exposure of RC building structures to the marine environment of the Valencia coast*”. *Construction and Building Materials* 100:11–21. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.016>

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). “*Cidades e Estados: Recife (PE)*”. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 13/06/2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2016). “*Cidades e Estados: Recife (PE)*”. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 13/06/2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). “*Cidades e Estados: Recife (PE)*”. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 13/06/2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). “*Censo Demográfico 2010, Grade Estatística 2010*”. Brasília, Brasil. Disponível em: <http://mapasinterativos.ibge.gov.br/grade/default.html>. Acesso em: 20/03/2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2002). “*Mapa de clima do Brasil 1:5 000 000*”. Brasília, Brasil. Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_200_2.pdf. Acesso em: 13/06/2019.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2018). “*Normais Climatológicas do Brasil (1981-2010) – Direção Predominante do Vento (Pontos cardeais e colaterais)*”. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 18/06/2019.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2018). “*Normais Climatológicas do Brasil (1981-2010) – Umidade Relativa do Ar Compensada*”. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 13/02/2019.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2018). “*BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - Série Histórica - Dados Mensais – Velocidade do Vento Média (mps)*”. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 24/06/2019.
- Johnson, S. M. (1965), “*Deterioration, maintenance, and repair of structures*”. McGraw-Hill, New York, USA.
- Luna, A. M., et.al. (2008), “*Mapeamento da Corrosividade Atmosférica do Estado do Ceará*”. INTERCORR 2008. Recife, Brasil.
- Cascudo, O., Helene P. R. L. (2001), “*Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado*”. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, São Paulo, Brasil.
- Pontes, R. B. (2006), “*Disseminação de íons cloreto na orla marítima do Bairro de Boa Viagem, Recife/PE*”, Dissertação Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Santos, L. H. M., et.al. (2014), “*Analysis of atmospheric aerosol (PM_{2.5}) in Recife city, Brazil*”. Journal of the Air & Waste Management Association, 64:5, 519-528. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.854282>
- Flores Larsena, S., Rengifob, L., Filippín, C. (2015), “*Double skin glazed fac, ades in sunny Mediterranean climates*”. Energy and Buildings 102:18–31. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.019>
- Silveira, F. L. (2011), “*Qual o peso equivalente que uma pedra de massa igual a 1 kg chega ao solo, jogada do 6 andar de um edifício?*”. Centro de Referência para o Ensino de Física - CREF, UFRGS. 01 jun. 2011. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=qual-o-peso-equivalente-que-uma-pedra-de-massa-igual-a-1-kg-chega-ao-solo-jogada-do-6-andar-de-um-edificio>. Acesso em: 14 fev. 2019.

- Souza, V. C., Ripper, T. (1998), “*Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*”. Pini, São Paulo, Brasil.
- Perinia, K., Bazzocchib, F., Crocib, L., Maglioccoa, A., Cattaneo, E. (2017), “*The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate*”. *Energy and Buildings* 143:35–42. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.036>
- Desai, V., Potter, R. (2014), “*The Companion to Development Studies*”. Routledge. Paignton. United Kingdom.
- Ventura, L. M. B., et.al. (2017), “*Chemical composition of fine particles (PM2.5): water-soluble organic fraction and trace metals*”. *Air Qual Atmos Health*. Springer Science. <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-017-0474-z>