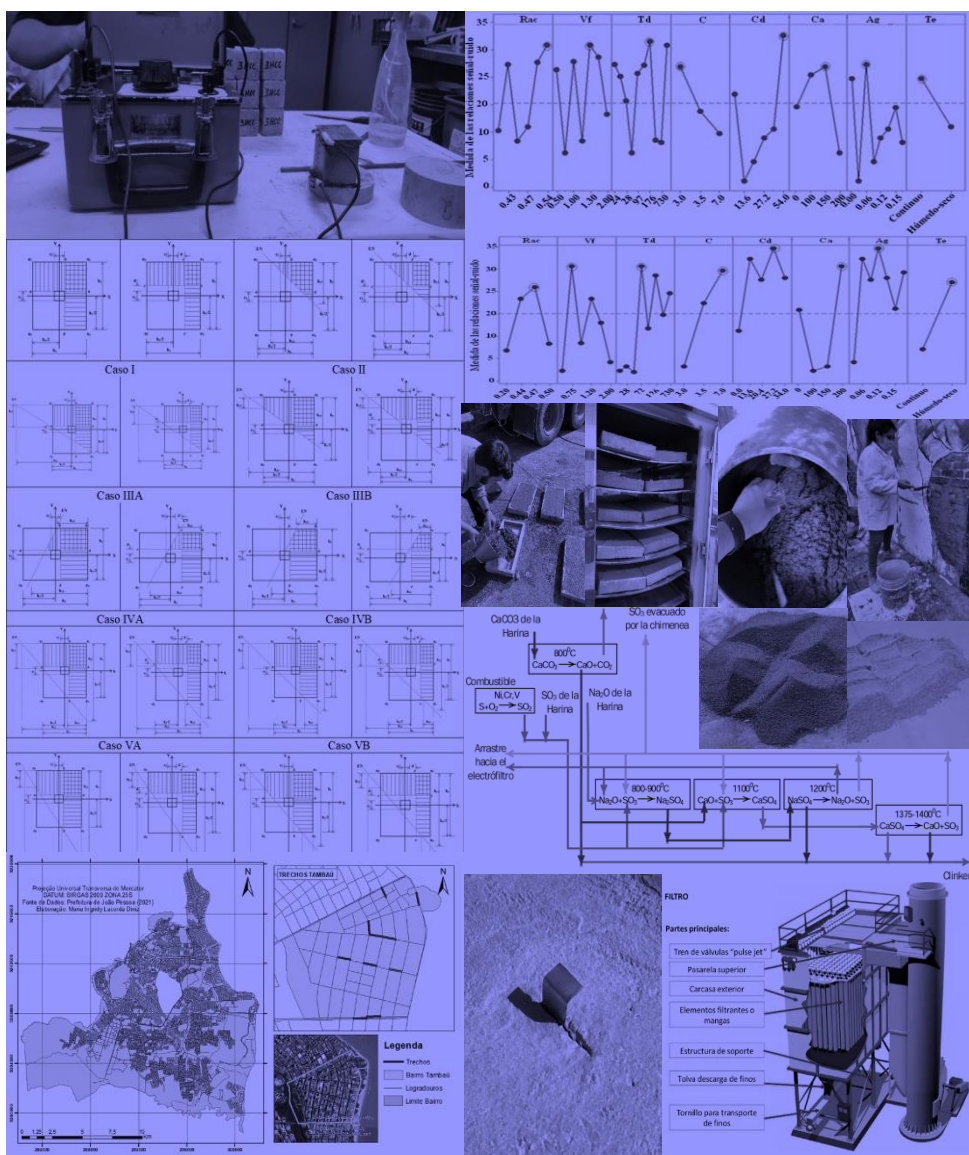
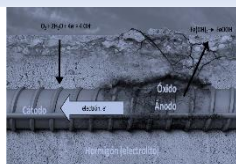




ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vicepresidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vicepresidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesorero

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

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

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

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

Co-Editor en Jefe (2022-2023):

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

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

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

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.
São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dra. Oladis Troconis de Rincón
Centro de Estudios de Corrosión
Universidad de Zulia
Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco
Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos
Universidad de Alicante
San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey, Querétaro
Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini
Universidad de Perugia,
Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu
Instituto Indio de Tecnología de Madrás,
Chennai, **India**

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

<http://www.revistaalconpat.org>

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

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

Esta edición V13 N2, inicia con un trabajo procedente de **México**, donde Alejandro Meza y colegas evalúan el efecto de variables experimentales en el estudio de la degradación por cloruros de concretos reforzados con fibras de acero (SFRCs). La información fue recopilada de diferentes fuentes literarias para después ser tratada mediante el diseño experimental de Taguchi y análisis de regresión. Los resultados muestran que los factores más influyentes en la degradación de SFRCs degradados por cloruro son la carga durante la degradación y el ancho de fisura, factores que impactan estadísticamente sobre resistencia residual y la carga máxima a flexión. Sin embargo, otros como la relación agua/cemento, el volumen de fibras, la concentración de cloruros y el tiempo de degradación demostraron poca influencia sobre la respuesta mecánica de los SFRCs.

En el segundo trabajo, procedente de **México**, Marco Antonio Navarrete-Seras y colegas analizan la influencia de la proporción de arena en morteros Tipo II según norma N-CMT-2-01-004/02 empleando tres tipos de áridos de la región de Morelia, Michoacán determinando su influencia en sus propiedades físico-mecánicas, contemplando el uso de diferentes materiales cementantes (MC): cemento Portland más cal (B1) y cemento Portland más cemento de albañilería (B2). Se elaboraron mezclas para B1 y B2 con relaciones en volumen arena/MC, desde 2.25 hasta 4, determinando la fluidez, resistencia a compresión uniaxial (UCS) y resistividad eléctrica húmeda (WER). Se estudió la relación entre la fluidez y la cantidad de agua/MC, concluyendo que el tipo de árido y proporciones modifican la fluidez y demanda de agua en estado fresco impactando en UCS y WER.

El tercer trabajo de este número es de **Brasil**, donde Rafael P. Gurkewicz y colegas estudian la capacidad de absorción de agua de los paneles de hormigón y su proceso de auto reparación mediante la incorporación de aditivo al hormigón o aplicación sobre la superficie. Mediante ensayos de permeabilidad, absorción de agua por inmersión y capilaridad, después del curado en húmedo, los paneles con aditivo cristalizador aplicado superficialmente mostraron menor capacidad de

absorción, seguidos de los de sin aditivo y los con aditivo incorporado, que mostraron mayor absorción. A través de la microscopía, se pudo observar que la cristalización de los paneles con aditivo superficial fue más avanzada en comparación con aquellos con aditivo incorporado. Las fisuras inducidas no alcanzaron el llenado completo de los poros después del curado en ambos tipos de aplicación.

En el cuarto artículo procedente de **México**, Arnulfo Luévanos Rojas muestra un nuevo modelo para diseño completo de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo funciona parcialmente a compresión. La metodología se presenta por integración para obtener momentos, cortantes por flexión y penetración. Los ejemplos numéricos se presentan para el diseño de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, y se comparan con el modelo actual (área total funciona en compresión) en términos de volúmenes de concreto y acero. El modelo actual muestra mayores volúmenes de concreto y acero. Por lo tanto, el nuevo modelo es el más adecuado, ya que presenta mejor control de calidad en los recursos utilizados.

El quinto artículo, de Marian Diniz y R. Melo, proviene de **Brasil**, y analizan la correlación entre el índice de condición del pavimento y la condición de dos elementos de drenaje superficial: desagües pluviales y cunetas. El estudio fue realizado a partir del análisis de 19 tramos, distribuidos por el barrio de Tambaú, en João Pessoa-PB. El cálculo del estado de los pavimentos se realizó por el método PCI y el estado de los elementos de drenaje se verificó mediante análisis subjetivo. Los resultados de la investigación mostraron cuando los elementos encajan o no en las condiciones ideales, y aunque los elementos de drenaje son considerados en el desempeño del pavimento, la evaluación estadística mostró una débil correlación entre la condición del pavimento y los elementos de drenaje evaluados.

El sexto trabajo de este número lo escriben Michel Donadio y colegas de **Suiza y México**, en el cual hacen un análisis documental sobre las diferentes técnicas de mitigación de la corrosión disponibles en la actualidad, como los morteros de reparación, los inhibidores activos y pasivos de la corrosión, los revestimientos protectores y la protección catódica con corriente inducida o galvánica. Estas estructuras, construidas para durar mucho tiempo, están sometidas al envejecimiento por influencias de su entorno, como el agua, el dióxido de carbono atmosférico y otros elementos nocivos como los cloruros y la contaminación. El proceso de deterioro más común en las estructuras de concreto armado es la corrosión y la consiguiente dilatación de la armadura de acero, lo que provoca la fisuración y el desconchado del concreto.

El artículo que cierra la edición es de Patricia Angulo y Carlos Ochoa de **México**, quienes identifican y discuten las estrategias sostenibles más ecoeficientes para aprovechar o reducir emisiones de NO_x, SO_x y polvos de SiO₂ en la fabricación de cemento, con el objetivo de mejorar la competitividad en la industria cementera de México. El diseño de investigación fue cualitativo,

observacional y deductivo. Los resultados mostraron que los biorreactores de residuos de SO_x tienen mayor ecoeficiencia; seguido de los domos para capturar y aprovechar el SiO₂ y los filtros de mangas. Estas estrategias son efectivas para contaminantes específicos derivados de la producción de cemento. Este estudio indaga en un tema escasamente abordado en México, la sostenibilidad del cemento. Al aplicar estas estrategias, el sector cementero mexicano impulsaría su competitividad empresarial.

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de evaluaciones y caracterizaciones de materiales, elementos y estructuras. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos.

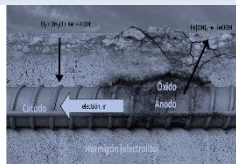
Te invitamos a colaborar enviando artículos para nuestro próximo número especial (RA V13 N3): “Aglutinantes combinados para hormigón sostenible y duradero”, donde los doctores Ravindra Gettu (India) y Yuvaraj Dhandapani (Inglaterra) serán los Editores Invitados.

Al cierre del número anterior, V13 N1 2023, 12 años después de haber iniciado operaciones, nuestro desempeño como Revista Alconpat se vió finalmente recompensado con nuestra inclusión en uno de los dos mejores índices para revistas como lo es Scopus de Elsevier. Nuestra pertenencia a Scopus tiene su histórico inicio el 29 de diciembre de 2022, fecha en la que recibimos la aprobación de Elsevier. Este es un motivo más de celebración para nuestra comunidad que ha hecho una inversión científica en nuestra revista esperando momentos como éste. Enhorabuena a todos.

Por el Consejo Editorial

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pedro Castro Borges', written over a circular stamp or seal.

Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



CONTENIDO

Página

REVISION

Becerra, O., Meza, A., Salinas, R.: Influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de acero (SFRC) en experimentos de degradación por cloruros: revisión bibliográfica y análisis estadístico.

143 – 157

INVESTIGACIÓN BÁSICA

Navarrete-Seras, M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Sanchez-Calvillo, A., Arreola-Sanchez, M., Borrego-Perez, J. A., Perez-Castellanos, N. A., Ruiz-Torres, R. P., Duran-Ramos, A. M., Alonso-Guzman, E. M.: Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación.

158 – 174

Alves, F. E. Z., Gurkewicz, R. P., Zancan, E. C., Nieves, L. J. J., Antunes, E. G. P.: Estudio de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato.

175 – 191

Luévanos Rojas, A.: Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión.

192 – 219

INVESTIGACIÓN APLICADA

Diniz, M., Melo, R.: Análisis de la correlación entre el estado de los pavimentos urbanos y elementos del sistema de drenaje.

220 – 234

INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Donadio, M., Capacho, J., Santander, L.: Gestión integral de la corrosión. Análisis documental.

235 – 253

Angulo, P., Ochoa, C.: Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México.

254 – 270

Influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de acero (SFRC) en experimentos de degradación por cloruros: revisión bibliográfica y análisis estadístico

O. Becerra¹ , A. Meza^{1*} , R. Salinas² 

*Autor de Contacto: alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

Recibido: 04/10/2022 | Correcciones recibidas: 15/04/2023 | Aceptado: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de variables experimentales en el estudio de la degradación por cloruros de concretos reforzados con fibras de acero (SFRCs). La información fue recopilada de diferentes fuentes literarias para después ser tratada mediante el diseño experimental de Taguchi y análisis de regresión. Los resultados muestran que los factores más influyentes en la degradación de SFRCs degradados por cloruro son la carga durante la degradación y el ancho de fisura, factores que impactan estadísticamente sobre resistencia residual y la carga máxima a flexión. Sin embargo, otros como la relación agua/cemento, el volumen de fibras, la concentración de cloruros y el tiempo de degradación demostraron poca influencia sobre la respuesta mecánica de los SFRCs.

Palabras clave: concretos reforzados con fibra de acero; degradación; cloruros; variables experimentales; propiedades mecánicas.

Citar como: Becerra, O., Meza, A., Salinas, R. (2023), “Influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de acero (SFRC) en experimentos de degradación por cloruros: revisión bibliográfica y análisis estadístico”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 143 – 157, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

¹ Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica, Facultad de Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

² Departamento de Estadística, Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Osler Becerra Pérez contribuyó con la búsqueda y recopilación de información, con el análisis estadístico de dicha información en alrededor de un 50%, la discusión de los resultados en un 40% y la elaboración del borrador del artículo. El autor Alejandro Meza de Luna contribuyó con la dirección y gestión de la investigación, la discusión de los resultados en un 40%, revisión y ajustes del artículo en un 80%, y las funciones de autor de correspondencia. El autor Rogelio Salinas contribuyó con el análisis estadístico de toda la información encontrada en un 50%, la discusión de los resultados en un 20%, y la revisión y ajustes del artículo en un 20%.

Licencia Creative Commons

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

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effect of experimental variables in the study of chloride degradation of steel fiber reinforced concrete (SFRCs). The information was collected from different literary sources to later be treated through Taguchi's experimental design and regression analysis. The results show that the most influential factors in the degradation of SFRCs degraded by chloride are the load during degradation and the crack width, factors that statistically impact on residual resistance and maximum flexural load. However, others such as the water/cement ratio, fiber volume, chloride concentration and degradation time showed little influence on the mechanical response of the SFRCs.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; degradation; chlorides; experimental variables; mechanical properties.

Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito de variáveis experimentais no estudo da degradação de cloretos de concretos reforçados com fibras de aço (SFRCs). As informações foram coletadas de diferentes fontes literárias e tratadas por meio do ábaco experimental de Taguchi e da análise de regressão. Os resultados mostram que os fatores mais influentes na degradação dos SFRCs degradados por cloreto são a carga durante a degradação e a abertura da fissura, fatores que impactam estatisticamente na resistência residual e na carga máxima de flexão. No entanto, outros como relação água/cimento, volume de fibras, concentração de cloretos e tempo de degradação mostraram pouca influência na resposta mecânica dos SFRCs.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras de aço; degradação; cloretos; variáveis experimentais; propriedades mecânicas.

Nomenclatura:

Vrr: Variación de la resistencia residual (%)

Vcm: Variación de la carga máxima (%)

Rac: Relación agua/cemento

Vf: Volumen de fibra (%)

Td: Tiempo de degradación (días)

C: Concentración de cloruros (% w/w)

Cd: Carga ejercida durante la degradación (kN)

Ca: Corrosión acelerada (uA/cm²)

Ag: Ancho de fisuras controladas (mm)

Te: Tipo de experimento

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado mundialmente, esto se debe fundamentalmente a la disponibilidad de los materiales que lo constituyen (Chen y col., 2021). El concreto tiene propiedades que lo han convertido en el material de construcción por excelencia, ya que posee una elevada resistencia a la compresión, pudiendo pasar décadas sin requerir de prácticamente ningún mantenimiento o sustitución (Paul y col., 2020). A pesar de estas cualidades, el concreto presenta una relativamente baja resistencia a la flexión debido a los esfuerzos de tensión que se presentan, por lo que se ha hecho necesario la utilización de materiales de refuerzo en la preparación de concretos, que permitan mejorar sus características (Chen y col., 2021). Desde el siglo XIX hasta la actualidad, se ha empleado acero en forma de barras para reforzar las estructuras de concreto. Aunque las barras de refuerzo siguen siendo las más utilizadas para este fin, el uso de fibras ha tenido un auge significativo en las últimas décadas, generando lo que se conoce como concreto reforzado con fibras de acero, (SFRC, por sus siglas en inglés), las fibras mejoran las propiedades a tensión del concreto, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto, la tenacidad y ayudan a controlar el agrietamiento del mismo (Behbahani y Nematollahi, 2011; Kaur y col., (2012), Ferreira y col., 2018; Zhang y col., 2020). El SFRC es utilizado, por ejemplo, en el revestimiento de túneles, construcción de carreteras, y construcciones propensas a sufrir daños por terremotos (Berrocal, 2015; Marcos-Meson y col., 2019; Zhang y col., 2020). Además, el SFRC es aplicado en infraestructuras donde existen ambientes agresivos como, pisos industriales, construcciones para almacenar residuos nucleares, estructuras hidráulicas y marinas, como muelles, plataformas petrolíferas y gasoductos (Doo-Yeol y col., 2021, Hou y col., 2021). Entre los materiales más comúnmente utilizados para este fin se encuentra el acero, materiales poliméricos y fibras de carbono, aunque también se ha reportado el uso de vidrio, coco, yute y amianto (Meza y Siddique, 2019; Paul y col., 2020; Meza y Shaikh, 2020; Meza y col., 2021), así como fibra vegetal de agave (Juárez-Alvarado y col., 2017). Las fibras de acero son el material que más se ha empleado y estudiado como refuerzo del concreto (Horszczaruk, 2009; Hou y col., 2021). Como se ha visto anteriormente los SFRCs son utilizados en infraestructuras sometidas a ambientes agresivos, por ello, la comunidad científica se ha encargado de investigar los diferentes procesos degradativos a los que pueden estar sometidas las estructuras fabricadas con SFRC. Diversas investigaciones indican que la corrosión es el principal mecanismo de degradación de las estructuras de concreto reforzado (Paul y col., 2020; Berrocal y col., 2015; Berrocal y col., 2017). La corrosión causa la disminución de la sección transversal del refuerzo de acero (Berrocal, 2015), lo que influye negativamente en las características mecánicas del concreto reforzado con barras de acero y el SFRC, aunado a esto, es importante decir que el proceso de corrosión afecta no solo a al refuerzo, sino también al concreto que las rodea, esto se debe a que se forman productos de corrosión, los cuales se acumulan en la interfase acero-concreto y al aumentar el volumen se originan presiones internas que causan el agrietamiento del concreto, proceso conocido como spalling (Simões y Santo, 2019), que a su vez aumenta la tasa de corrosión y con ello provoca cambios en las propiedades mecánicas del mismo, entre ellas, la carga máxima y la resistencia residual (Berrocal y col., 2017; Paul y col., 2020). Según Abbas y col., (2014), la penetración de cloruros en paredes de túneles provoca la corrosión del refuerzo disminuyendo así su capacidad de carga. También, otros investigadores como Granju y Balouch, (2005) y Carrillo y col., (2017), afirman que los ambientes corrosivos pueden afectar el desempeño a flexión del SFRC si las fibras de acero son corroídas, ya que éstos provocan reducciones en el pico máximo de carga, acompañado de un comportamiento post-pico frágil y quebradizo. Además, estudios como el de Hou y col., (2021) indican que la disminución de la resistencia residual en SFRCs tiene un estrecho vínculo con la pérdida de masa del refuerzo, la corrosión por picaduras, el deterioro de la adherencia entre el refuerzo-concreto-tasa de corrosión.

Por otra parte, son varios los factores que influyen en el proceso de corrosión, ya que este depende tanto de las características del metal corroído como del medio circundante en que el mismo se encuentra. Uno de estos factores es la presencia de agentes externos como las sales que contienen el ion cloruro, por ejemplo, el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro, cloruro de amonio y el cloruro de sodio. Estas sales al entrar en el concreto disminuyen su pH y aceleran el proceso de corrosión del refuerzo de acero (Salazar-Jiménez, 2015). Específicamente, la degradación por cloruros, provoca el llamado efecto de corrosión por picadura, esto ocurre cuando se acumulan suficientes cloruros en la superficie de refuerzo favoreciendo así el proceso corrosivo en una zona específica del material (Berrocal y col., 2015).

La degradación de concretos reforzados con fibra por la acción de cloruros ha sido ampliamente estudiada, esto debido a la exposición de infraestructuras a ambientes agresivos con elevadas concentraciones de este anión (Berrocal y col., 2015). Es por ello que se han llevado a cabo investigaciones enfocadas tanto el efecto de la degradación en las fibras, en el concreto, como en el conjunto fibra-concreto, obteniendo que tanto varían las propiedades mecánicas de los mismos, luego de ser sometidos a procesos degradativos por cloruros. Disímiles tipos de fibras y concretos bajo diferentes condiciones experimentales han sido puestos a prueba, esto ha dado lugar a que los resultados obtenidos en dichas investigaciones sean muy variados y no siempre se correlacionen unos con otros, por lo que todavía no queda totalmente claro cuáles son las variables experimentales que más afectan las características mecánicas de los concretos y en qué medida lo hacen, lo que podría solucionarse mediante la realización de análisis comparativos e investigación.

Por las razones anteriormente mencionadas, en este estudio se hace una recopilación de datos experimentales obtenidos en condiciones de laboratorio, relacionadas con la degradación de SFRC bajo la acción de cloruros. Los datos provenientes de diferentes investigaciones se sometieron a un análisis estadístico donde se identifican las variables experimentales que más influyen en la corrosión de las fibras, en el deterioro en general de los concretos y en qué medida afectan sus propiedades al ser sometidos a esfuerzos por flexión. Para ello, se realizó el análisis de datos experimentales obtenidos de la bibliografía mediante el diseño experimental robusto de Taguchi, el cual es un método de análisis que está enfocado en maximizar una razón señal ruido (S/R) específica para cada una de las variables estudiadas, (Kuehl, 2000). El objetivo de la presente investigación es conocer las variables experimentales que afectan a las respuestas, las cuales son la disminución de la carga máxima y disminución de la resistencia residual luego del proceso de degradación. También se empleó un análisis de regresión que represente los resultados obtenidos mediante el análisis experimental. Se desea que los resultados alcanzados sirvan como base para los investigadores que comienzan en el estudio de los concretos reforzados con fibras de acero y su degradación por la acción de cloruros, pues se hace una revisión y análisis bibliográfico de lo más relevante publicado respecto a este tema en los últimos años.

2. PROCEDIMIENTO

Como parte del procedimiento seguido en esta investigación, primeramente, se identificaron las variables experimentales que se han estudiado a lo largo del tiempo al realizar ensayos a flexión de SFRCs que, han sido previamente expuestos a degradación por cloruros y cuya variación influye de manera directa en las propiedades mecánicas de carga máxima y resistencia residual. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el diseño experimental de Taguchi mediante la ayuda del Software Minitab (Minitab 17.0), además se hizo un análisis de regresión donde se corroboró la influencia de las variables experimentales en la variable de respuesta (ver Figura 1).

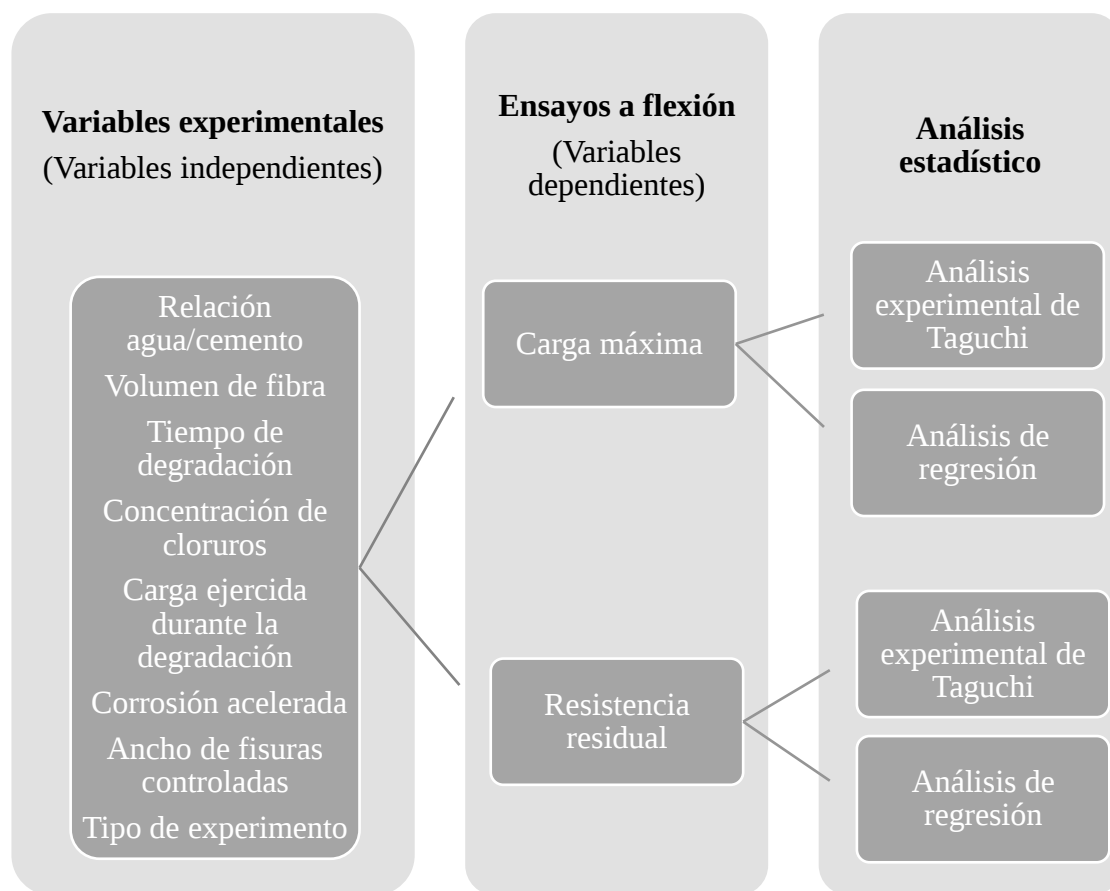


Figura 1. Esquema representativo del procedimiento seguido en la investigación.

Una de las variables más estudiadas es la relación agua/cemento (Rac). Las proporciones de agua y cemento que se utilizan al preparar el concreto influyen de manera significativa en los procesos corrosivos que puede sufrir la estructura, esto se debe a que entre mayor es la cantidad de agua, mayor densidad de microporos habrá en la matriz del concreto, los cuales facilitan la entrada de agentes corrosivos como lo son los cloruros. Además, mientras mayor sea la cantidad de agua, mayor será la humedad en la estructura, la cual es el electrolito que facilita la reacción de oxidación de las fibras de acero. Según Balouch y col., (2010), al existir relaciones agua/cemento (Rac) elevadas ($Rac = 0.78$), las fibras que se encuentran cerca de la superficie del concreto (< 1 mm), presentan signos de corrosión y mientras más se redujo esta proporción, menor fue el espesor necesario para que no hubiera corrosión en las fibras. Otra variable determinante en la degradación de los SFRC es el volumen de fibras (V_f) a utilizar en la preparación de las muestras, varios autores han encaminado sus estudios en determinar su influencia en las propiedades mecánicas de estos concretos. Por ejemplo, en su estudio, Chen y col., (2021), llegan a la conclusión que luego del proceso de degradación con cloruro de sodio, al utilizar un contenido de fibra mayor, se obtiene como resultado un incremento en la resistencia dinámica y por ende un incremento en la deformación. También, la concentración de cloruros (C) de la solución acuosa con que se degrada la pieza de concreto en estudio tiene una influencia significativa en la corrosión de las fibras y por tanto en las propiedades de los concretos estudiados. Se ha demostrado que el contenido máximo de cloruro en estructuras de concreto convencionales no debería superar del 0.4 al 1.0% por peso de cemento, siendo esta cifra mayor para los SFRCs, llegando a valores permisibles hasta del 1.7% (Berrocal y col., 2013). Por otra parte, en varios estudios de degradación de SFRCs se ha optado por agrietar los concretos con el fin de obtener mayores índices de corrosión en menores períodos de tiempo, es por ello que el ancho de fisuras controladas (A_g) es una variable a tener en cuenta en esta investigación, los resultados muestran que las grietas permiten el transporte de agentes

agresivos al interior de las estructuras (Berrocal y col., 2015; Blagojevic, 2016), demostrando que si este supera cierto umbral de ancho de fisuras, podrían verse afectadas las propiedades de los concretos. Investigaciones han revelado que el coeficiente de difusión de cloruro es similar en SFRC no fisurados y en fisurados con anchos de grietas inferior a 0.2 mm (Hou y col., 2021), lo que da una cierta medida del ancho de fisuras a utilizar en experimentos de este tipo. Otra variable a tener en cuenta es el tiempo de degradación (Td) al que se someta la muestra estudiada. El proceso de degradación de los concretos reforzados puede dividirse en dos etapas fundamentales: iniciación y propagación. La primera etapa es considerada como el tiempo necesario que requieren los agentes externos para ingresar en las estructuras de concreto y causar la depasivación del acero. En la segunda etapa ocurre la propagación de la corrosión del acero y comienzan a ocurrir cambios en la estructura que reducen la seguridad de la misma, lo que indica que mientras mayor sea el tiempo transcurrido en condiciones de degradación es de esperar que el daño en la estructura sea mayor (Berrocal y col., 2015). Por otra parte, es importante mencionar que las estructuras de SFRC sometidas a ambientes degradativos y bajo cargas por flexión, podrían sufrir afectaciones de sus propiedades mecánicas, esto debido a la doble influencia de la corrosión y la aplicación de una fuerza externa. Por tal motivo la carga durante la degradación (Cd) es una variable que ha sido investigada en variedad de estudios dedicados a este tema. Aunque aún no está completamente claro la influencia de cargas durante el proceso de corrosión de concretos reforzados con fibra, se ha demostrado que la acción fuerzas a vigas experimentales de SFRCs, han aumentado el ancho de fisuras controladas formadas, lo que podría provocar un aumento en la velocidad de corrosión de las fibras (Li y col., 2018). Es importante señalar que muchos investigadores utilizan métodos alternativos para realizar experimentos de degradación en concretos reforzados con fibras de acero, esto se debe a que el proceso de corrosión de las fibras es lento y en algunos casos podrían pasar años para que existan efectos apreciables de daños en los concretos de forma natural (Taqi y col. 2021). Por tanto, la corrosión acelerada (Ca) surge como una alternativa experimental adecuada en estos casos, esta consiste en hacer fluir una corriente eléctrica en los especímenes de SFRC a la vez que se encuentran bajo la acción de cloruros. Este efecto combinado provoca que el umbral de cloruro que es necesario superar para que ocurra la depasivación del acero, disminuya y por lo tanto ocurra la corrosión de las fibras con mayor rapidez (Tang y Wilkinson, 2020). Por último, otra de las variables experimentales a tener en cuenta en estudios de degradación es el tipo de experimento (Te), ya que existen dos formas de realizar estas pruebas. Una consiste en el mojado continuo de la pieza de concreto con una solución de cloruro de sodio (NaCl) durante un tiempo determinado y la otra se basa en ciclos de mojado y secado, en los cuales, los especímenes de concreto son sumergidos en soluciones de NaCl durante un determinado tiempo y luego dejados secar durante otro lapso de tiempo definido, y así se repite el ciclo una cierta cantidad de veces. Se ha demostrado que este tipo de experimento resulta la condición ambiental más desfavorable para las estructuras de SFRC sometidas a condiciones de degradación provocadas por la acción de cloruros (Balouch y col., 2010).

Por la revisión bibliográfica realizada, se obtuvieron datos experimentales de diferentes trabajos relacionados con la degradación de concretos reforzados con fibras de acero (ver Tabla 1). Como se ha mencionado, este trabajo se enfocó en la influencia de las variables experimentales anteriormente mencionadas en la reducción de la carga máxima y la resistencia residual luego del proceso de degradación en pruebas de flexión. De manera general, los autores se basaron en la norma EN 14651: 2007 para los ensayos de flexión de tres puntos (Marcos-Meson y col., 2021), así como en las normas EN 1015-3:1999, EN 413-2: 2016 y EN 14889-1: 2006 para el uso de superplastificante, el contenido de aire y el tipo de fibra a utilizar respectivamente en la elaboración de los especímenes de concreto (Marcos-Meson y col., 2020).

Tabla1. Relación de trabajos consultados para obtener los datos estudiados.

Autor	Rac	Vf (%)	Td (días)	C (%w/w)	Cd (kN)	Ca (uA/cm²)	Ag (mm)	Vcm (%)	Vrr (%)
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	0	0	0	-	28,79
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	54	0	0	-	42,28
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	89	0	0,14	-	66,62
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,15	5.45	9,41
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,3	-22.14	-18,87
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,15	-1.92	2,35
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,3	-32.82	-33,96
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,15	3.25	-11,30
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,3	16.01	1,64
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,15	-21.75	-7,83
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,3	17.20	12,30
Michel, 2013	0,43	0,5	24	3	0	150	0,07	-	26,44
Michel, 2013	0,43	1	24	3	0	150	0,07	-	20,39
Berrocal, 2017	0,47	0,5	27	3,5	0	100	0	1.29	17,98
Berrocal, 2017	0,47	0,5	97	3,5	0	100	0	-23.56	19,10
Bui, 2021	0,5	1	28	3	0	150	0	2.66	29,59
Bui, 2021	0,5	1,5	28	3	0	150	0	1.30	19,39
Bui, 2021	0,5	2	28	3	0	150	0	0.86	16,33
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	28	3,5	0	0	0	-1.90	1,43
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	70	3,5	0	0	0	1.24	-10,00
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	140	3,5	0	0	0	3.86	22,86
Bernard, 2019	0,5	1,5	176	3,5	0	0	0,15	15.31	37,50
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	13,6	200	0,06	23.35	1,98
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	20,4	200	0,09	13.55	2,97
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	27,2	200	0,12	30.51	4,95
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	34	200	0,14	14.23	5,94

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Efecto de variables experimentales sobre la variación de la carga máxima

Para determinar el efecto de las variables experimentales sobre la variación de la carga máxima (V_{cm}), se seleccionaron los valores de disminución de carga máxima que más se repitieron en ensayos por flexión de SFRCs luego de ser sometidos a procesos degradativos por cloruros. Para ello, se realizó un histograma con estos valores, obteniéndose que el mayor número de variaciones se encuentran de -6 a 5% (ver Figura 2), no obstante, en este trabajo se decidió no trabajar con los valores negativos, pues esto significa que existe un aumento de la carga máxima en los concretos estudiados luego de ser expuestos a cloruros y no es objetivo de la presente investigación el estudio de este comportamiento. Por lo tanto, se tomaron los valores positivos de 0 a 31% y con estos datos se trabajó.

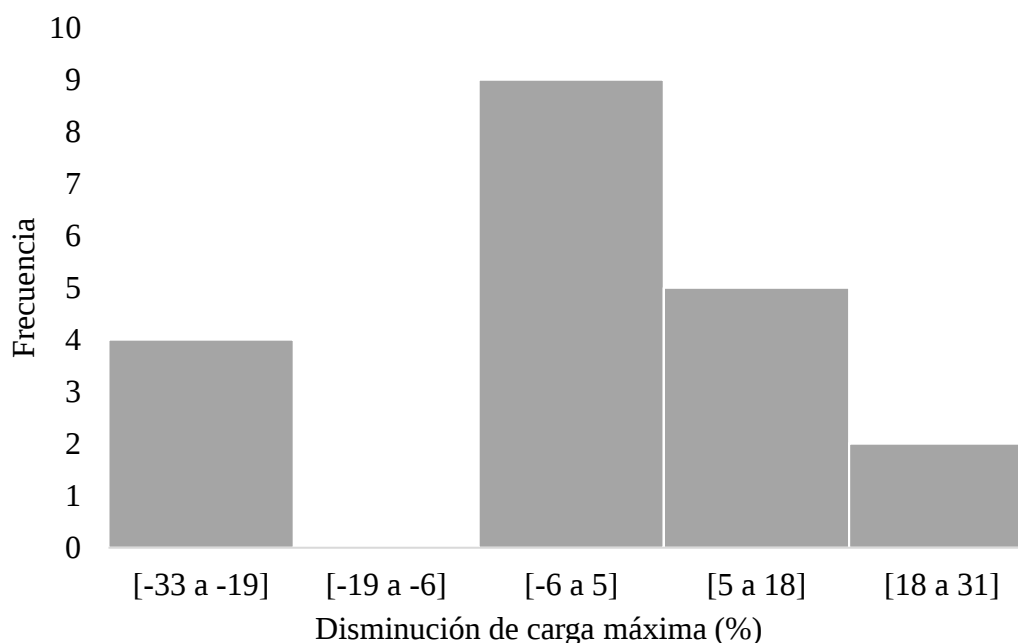


Figura 2. Histograma de variación de carga máxima.

3.1.1. Análisis de la Gráfica de Señal-Ruido

Analizando la Figura 3, es posible determinar cuáles factores de control tienen más incidencia en la variable de respuesta (la variación de la carga máxima), esto se hace mediante la observación de las líneas en cada variable, cuando las líneas son horizontales no hay un efecto presente y cada nivel afecta la respuesta de la misma manera, mientras que cuando las líneas no son horizontales si existe un efecto principal y cada nivel influyen en la respuesta de manera diferente, es decir, cuanto mayor sea la distancia en la posición vertical entre los puntos trazados, mayor será la magnitud del efecto (Antony y col., 2006). Por lo tanto, es posible afirmar que el ancho de fisuras controladas (A_g) es la variable con mayor efecto en la capacidad de carga máxima a flexión de especímenes SFRCs degradados por cloruros. A esta variable le siguen el volumen de fibra (V_f), el tiempo de degradación (T_d), la concentración de cloruros (C) y la corrosión acelerada (Ca), por orden de incidencia en la variable de respuesta, los cuales, son las que presentan mayor separación entre sus niveles. Por último, son la relación agua/cemento (R_{ac}), la carga durante la degradación (C_d) y el tipo de experimento (T_e), los factores con menor efecto sobre la variación de la carga máxima. Ahora bien, al ser objetivo de este trabajo encontrar que valores de las variables experimentales que causan una mayor disminución de la carga máxima, estos pueden ser determinados por el mayor valor de cada factor en la gráfica de señal-ruido en la Figura 3 (señalados por un círculo

rojo). Por tanto, un diseño de experimento recomendado para obtener los mayores efectos experimentales de variación de carga máxima a flexión en especímenes de SFRCs es la siguiente: Rac (0.47), Vf (0.75%), Td (72 días), C (7%), Cd (27.2 kN), Ca (200 uA/cm²), Ag (0.12) y Te (húmedo-seco).

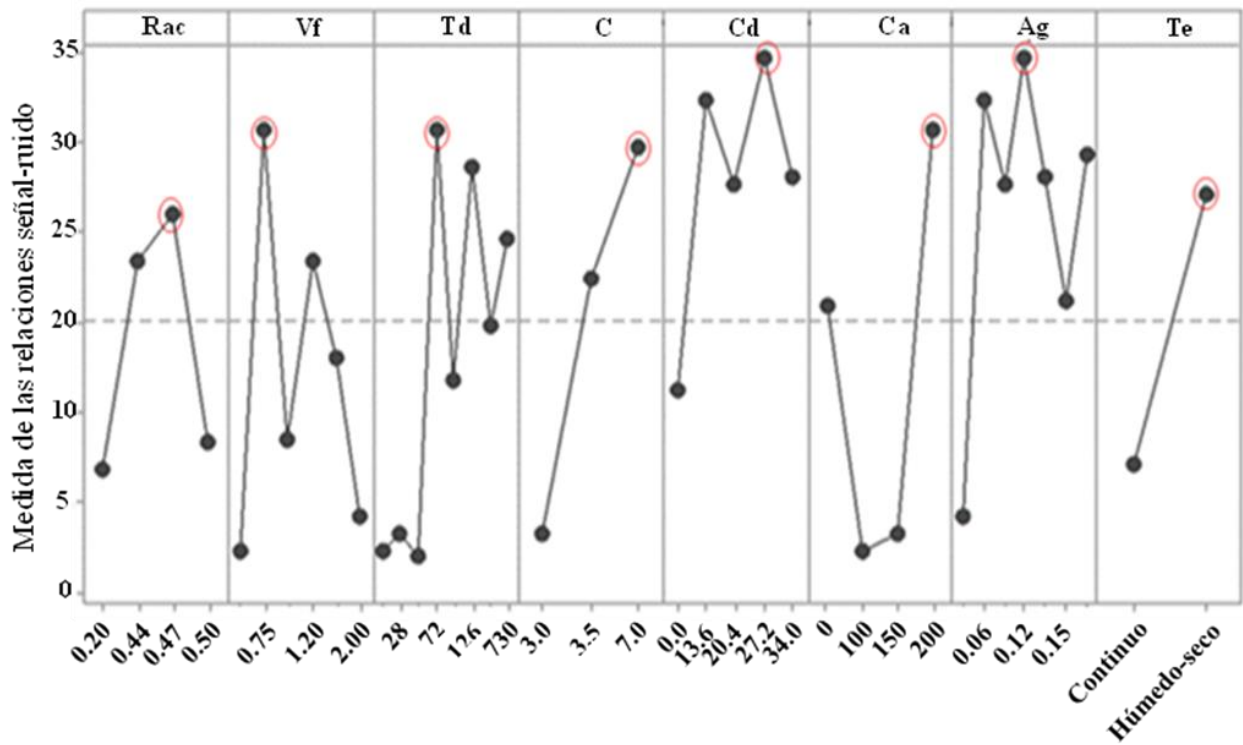


Figura 3. Gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido para experimentos de carga máxima.

3.1.2. Análisis de regresión

Analizando la Tabla 2, la cual es el resultado del análisis de varianza para las variables estudiadas, se puede determinar que, para ninguna de dichas variables estudiadas el Valor p es menor a 0.05, lo que significa que estas no impactan estadísticamente en los resultados de variación de la carga máxima a flexión. De hecho, la variable con mayor impacto estadístico en la figura anterior, la cual fue el ancho de fisuras controladas, tuvo un Valor p de 0.081 en este análisis. Esto demuestra que el análisis de varianza no es una herramienta útil en este caso para determinar la influencia de las variables explicativas sobre la variable de respuesta.

Tabla 2. Análisis de varianza de las variables estudiadas para variación de carga máxima.

Variables	Valor p
Relación agua/cemento	0.544
Porcentaje de fibra	0.841
Tiempo de degradación	0.305
Concentración de NaCl	0.963
Carga durante la degradación	0.812
Corrosión acelerada	0.557
Ancho de fisura	0.081
Tipo de experimento	0.677

Haciendo el análisis de las ecuaciones de regresión para la variable cualitativa, la cual en este estudio es el tipo de experimento, se pueden determinar cuáles son las variables experimentales que tienen poder explicativo sobre la variable de respuesta (ver ecuaciones 1 y 2). Esto es posible determinarlo por las variables que cuenten con coeficiente positivo, las cuales que en este caso son el ancho de fisura controlada, la concentración de NaCl y la corrosión acelerada. Estas ecuaciones fueron obtenidas con los datos con que se trabajan en este estudio mediante el uso de Minitab.

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento continuo:

$$V_{cm} = 13.0 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (1)$$

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento húmedo-seco:

$$V_{cm} = 17.6 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (2)$$

Considerando por tanto los estudios realizados hasta el momento, para determinar la influencia de las variables experimentales sobre la variación de la carga máxima, los cuales fueron la gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido, el análisis de varianza y de las ecuaciones de regresión, es posible concluir que el ancho de fisuras controladas es la variable experimental que mayor efecto tiene sobre la carga máxima en concretos reforzados con fibras de acero que sufren degradación por cloruros, aunque no existen trabajos dedicados específicamente al estudio de la influencia de esta variable sobre la carga máxima, en investigaciones como la de Hou y col., (2021) se muestran resultados contradictorios, pues al utilizar un $A_g = 0.06$ mm la disminución de la carga máxima es de 23.35%, mientras para anchos de grietas de 0.09 mm es de 13.55% y para valores de 0.12 mm la variación es de 30.51%, lo que demuestra que la variación de esta propiedad no solo depende de esta variable. Por otra parte, otra de las variables con influencia en variación de la carga máxima según los resultados aquí obtenidos es la concentración de cloruros, aunque esta información no ha podido ser corroborada aún por falta de información bibliográfica, en trabajos como el de Marcos-Meson y col. (2021) se aprecia como influye de manera negativa esta variable en las propiedades de los SFRCs estudiados.

3.2. Efecto de variables experimentales en la variación de la resistencia residual

Para analizar los datos de variación de resistencia residual (V_{rr}) obtenidos se hizo de forma similar que para los datos de carga máxima a flexión. Se realizó un histograma de la variación de la resistencia residual, donde, como se observa en la Figura 4, la mayor frecuencia de variaciones se encuentra de 0 a 17% y de 17 a 34%, son por tanto estos los datos que se tomaron para este estudio. Se observa además que existen valores por debajo de cero, los cuales no se utilizaron por las razones anteriormente mencionadas, al igual que los datos mayores a 34% ya que son poco frecuente este tipo de resultados.

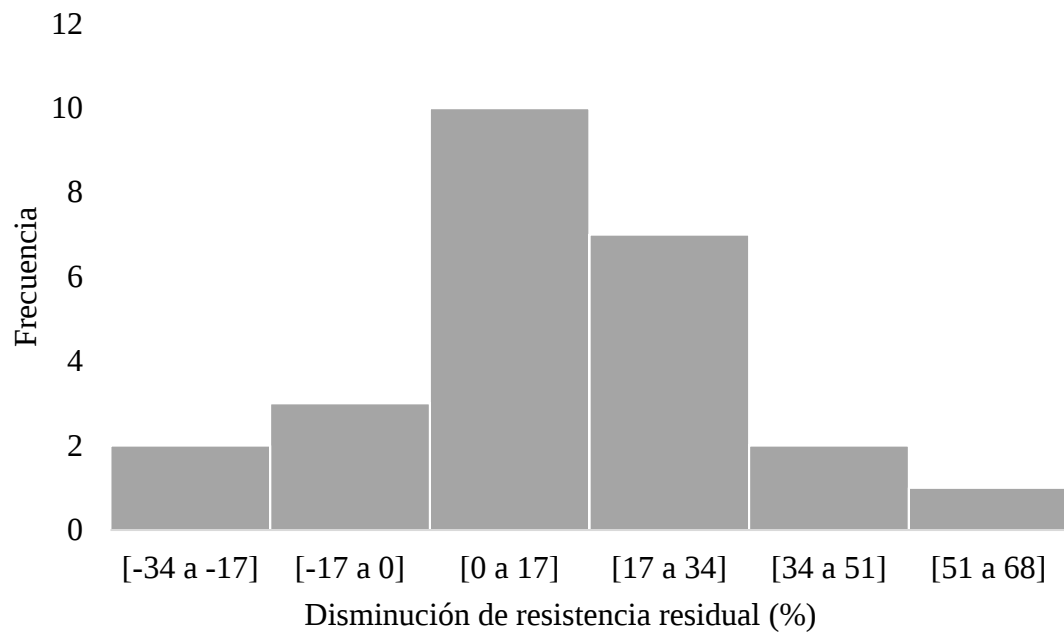


Figura 4. Histograma de variación de resistencia residual.

3.2.1. Análisis de la Gráfica de Señal-Ruido

Analizando la Figura 5, es posible determinar que los factores de control que reducen la variabilidad son, en primer lugar, la carga a flexión durante la degradación, ya que es la que presenta una mayor tendencia vertical en el gráfico señal-ruido.

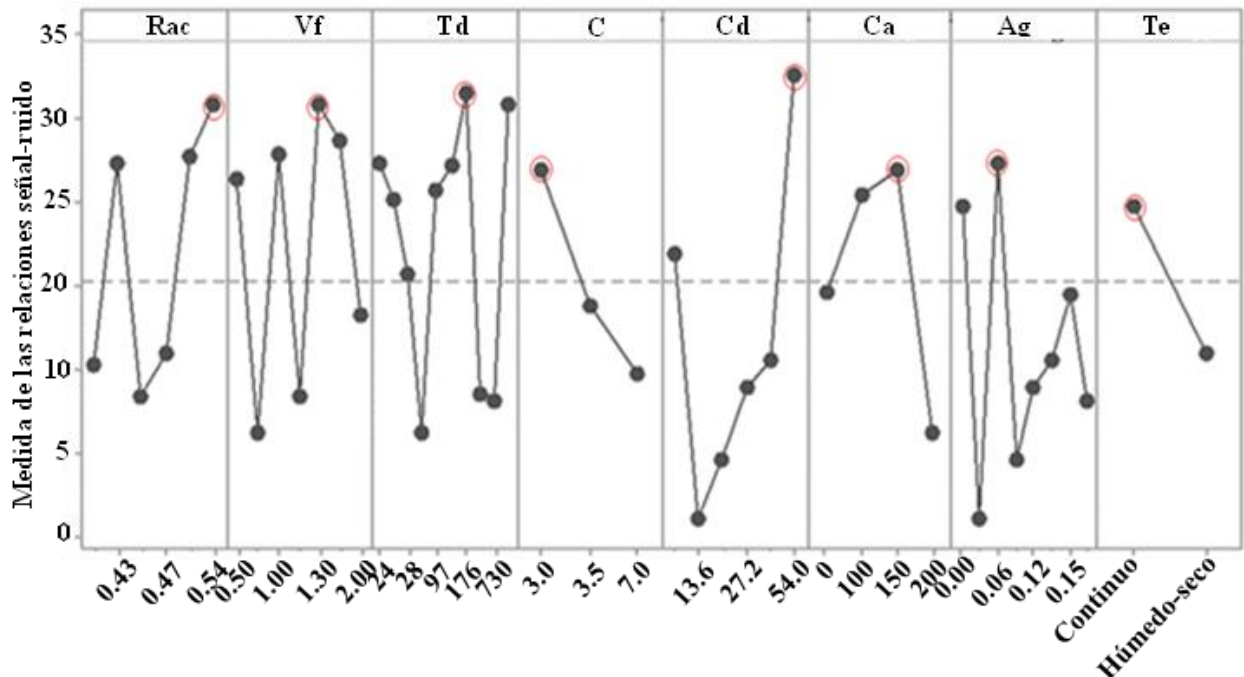


Figura 5. Gráfica de efectos principales para relaciones señal – ruido para experimentos de resistencia residual.

Le sigue la relación agua/cemento, el volumen de fibras, el tiempo de degradación y el ancho de fisuras controladas, siendo los niveles recomendados en cada caso para obtener mayores efectos en la disminución de la resistencia residual los siguientes: Cd (54 kN), Rac (0.54), Vf (1.3%), Td (176

días) y Ag (0.07 mm), respectivamente. Estos valores se obtienen tomando el valor del nivel más elevado en cada factor en la Figura 5, señalados con un círculo rojo. Por su parte, las demás variables se encuentran más cerca de la media y tienen un menor efecto sobre la relación de señal-ruido, no obstante, para llevar a cabo un diseño experimental con el fin de obtener los mayores niveles de variación de resistencia residual también se deben tener en cuenta. Por lo tanto, en el caso de la concentración de cloruros, la corrosión acelerada y el tipo de experimento, los valores recomendados son 3%, 150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y experimento continuo respectivamente.

3.2.2. Análisis de regresión

También se realizó un análisis de regresión donde se estudió el análisis de varianza (Tabla 3), obteniéndose que el Valor p fue menor a 0.05 en las variables: carga durante la degradación (0.000) y tipo de experimento (0.002), lo que significa que estas variables tienen mayor influencia en la variación de la resistencia residual a flexión que las demás. Dicho resultado no es totalmente coincidente con los obtenidos en la gráfica de Señal/Ruido, pues en dicha figura la variable tipo de experimento tiene poca influencia en la variable de respuesta, lo cual es un elemento a analizar en futuros estudios.

Tabla 3. Análisis de varianza de las variables estudiadas para variación de resistencia residual.

Variables	Valor p
Relación agua/cemento	0.401
Porcentaje de fibra	0.452
Tiempo de degradación	0.196
Concentración de NaCl	0.085
Carga durante la degradación	0.000
Corrosión acelerada	0.907
Ancho de fisura	0.081
Tipo de experimento	0.002

Por otra parte, analizando los coeficientes de cada factor en las ecuaciones de regresión (ver ecuaciones 3 y 4), es posible determinar las variables con mayor influencia en respuesta son: la carga durante la degradación, la relación agua/cemento y el tiempo de degradación, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la Figura 5 y en parte con la tabla 3.

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento continuo

$$V_{rr} = 19.5 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (3)$$

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento húmedo-seco

$$V_{rr} = 3.1 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (4)$$

Es posible concluir entonces que, en los estudios de degradación de SFRCs por la acción de cloruros, la variable experimental que más incidencia tiene sobre la variación de la resistencia residual es la carga a la que son sometidos los especímenes de concreto durante la degradación. Resultados similares encontraron Nguyen y col. (2018), los cuales obtuvieron una disminución de la capacidad de carga de los concretos estudiados, una vez agrietados al haber sido sometidos a una carga sostenida mientras eran expuestos a cloruros, estos encontraron que las fibras de acero sufrieron corrosión cuando la carga aplicada fue del 50% de la carga de fluencia. De manera similar Hou y col. 2021 encontraron que al aumentar los niveles de carga sostenida a los concretos y bajo

condiciones de corrosión severa, la capacidad de carga de estos se vio afectada. De igual forma, la relación agua/cemento tiene marcada influencia en la variación de la resistencia residual, según los resultados aquí encontrados, aunque no existen actualmente en la literatura trabajos dedicados a comparar como influye esta variable en dicha propiedad. Por último, como se ha visto, el tiempo de degradación tiene también influencia en esta característica, siendo este resultado contradictorio con el obtenido por Marcos-Meson y col., 2021, ya que estos obtuvieron pocos cambios en el rendimiento mecánico de los SFRCs degradados por cloruros y dióxido de carbono durante 1 y 2 años. Lo cual significa que los resultados obtenidos en este tipo de estudios siguen siendo contradictorios y se requiere de futuras investigaciones.

4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los estudios realizados referentes a la degradación de concretos reforzados con fibras de acero por la acción de cloruros, y tomando en cuenta las principales variables experimentales que afectan las propiedades de resistencia residual y carga máxima de dichos concretos es posible arribar a las siguientes conclusiones:

1. Los resultados encontrados en la bibliografía muestran que los procesos degradativos por cloruros no solo afectan negativamente las propiedades mecánicas de los SFRC, sino que, en algunos casos, dichas propiedades pueden tener una mejoría luego de la degradación, esto se le atribuye a un aumento de la fuerza de unión entre el concreto y la fibra a causa de un aumento en la rugosidad superficial debido a la corrosión.
2. Haciendo un análisis en los resultados obtenidos para los experimentos donde se evaluó la variación de la carga máxima a flexión, se encuentra que la variable cuya variación incide más en esta propiedad es el ancho de fisuras controladas, siendo un valor de 0.12 mm el que más afecta la variable de respuesta, de igual forma, al ordenar las variables según su influencia en la variación de la carga máxima que soportan los SFRC y para obtener los mayores valores de pérdida de esta propiedad quedaría de la siguiente forma: Ag (0.12 mm), Vf (0.75%), Td (72 días), C (7%), Ca (200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), tipo de experimento (húmedo-seco) y Rac (0.47).
3. Para el caso de la resistencia residual a flexión, la variable experimental que más efecto tiene sobre esta propiedad, es la carga durante la degradación, encontrando que su influencia es directamente proporcional, es decir a mayor carga es de esperar que la resistencia residual luego del proceso degradativo se vea más afectada, de igual forma se obtuvo un orden de variables en cuanto a la influencia en la resistencia residual, por lo que es posible recomendar los siguientes valores de cada variable a emplear para obtener las mayores disminuciones de esta propiedad en experimentos de degradación: Cd (54 kN), Rac (0.54), Vf (1.3%), Td (176 días), Ag (0.07 mm), C (3%), Ca (150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y tipo de experimento (continuo). Estas variables fueron ordenadas desde la que más influye hasta la que menos lo hace.
4. Por los resultados obtenidos, se recomienda continuar con el estudio de la influencia de variables experimentales con otras propiedades de los concretos reforzados con fibras de acero como podrían ser la durabilidad, la tenacidad y la ductilidad, así como la influencia de otras variables como lo son el material de las fibras, el tamaño y la forma de los especímenes de concreto y el tipo de materia prima utilizado para la elaboración de estos.

5. REFERENCIAS

Abbas, S., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2014), *Mechanical Performance of reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments: A Case Study*, *Aci Materials Journal*, 501-510.

- Antony, F., Perry, D., Wang, C., Kumar, M. (2006), *An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process*, Operations and Quality Management Unit, Caledonian Business School, Glasgow Caledonian University, Glasgow, UK, <http://dx.doi.org/10.1108/01445150610645611>.
- Balouch, S. U., Forth, J. P., Granju, J. L. (2010), *Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, 40, 410–414, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.001>.
- Behbahani, H., Nematollahi, B. (2011), *Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*, ICSECM, Kandy-SriLanka.
- Bernard, E. S. (2019), *Durability of fibre-reinforced shotcrete*, TSE P/L, Penrith, Australia, <http://dx.doi.org/10.1201/9780203023389.ch6>.
- Berrocal, C. G., Fernandez, I., Lundgren, K., Löfgren, I. (2017), *Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC*, Composites Part B, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.020>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2015), *Corrosion of Steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art*, Cement and Concrete Research, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2013), *Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review*, Fibre concrete, Prague, Czech Republic.
- Blagojevic, A. (2016), *The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride-Induced Corrosion: A Look from a Different Perspective*, Doctoral Thesis, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
- Bui, L. V. H., Jongvivatsakul, P., Limpaninlachat, P., Stitmannaitum, B., Nguyen, T. T., Nguyen, T. P. (2021), *Simulation of shear behavior of corroded reinforced concrete beams flexurally repaired with steel fiber-reinforced concrete*, Structures, 34, 1545–1559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.087>.
- Carrillo, J., Cárdenas, Pulido, J., Aperador, W. (2017), *Propiedades mecánicas a flexión del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes corrosivos*, Revista Ingeniería de Construcción, 32, 59-72.
- Chen, H., Zhou, X., Li, Q., He, R., Huang, X. (2021), *Dynamic Compressive Strength Tests of Corroded SFRC Exposed to Drying–Wetting Cycles with a 37 mm Diameter SHPB*, Materials, 14, 2267, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14092267>.
- Doo-Yeol, Y., Shin, W., Chun, B., Banthia, N. (2021), *Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance*, Cement and Concrete Research, 133, 106091, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima, Neto A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A. J. C, Freire, M. C. (2018), *Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con mantas de PRFC*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 30 – 47, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>.
- Granju, J. L., Balouch, S. U. (2005), *Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*, Cement and Concrete Research, 572– 577, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>.
- Horszczaruk, E. K. (2009), *Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete*, Wear, 267, 110–115, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.010>.
- Hou, L., Peng, Y., Xu, R., Zhang, X., Huang, T., Chen, D. (2021), *Corrosion behavior and flexural performance of reinforced SFRC beams under sustained loading and chloride attack*, 242, 112553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112553>.
- Juárez-Alvarado, C. A., González López, J. R., Mendoza-Rangel, J. M., Zaldivar Cadena, A. A. (2017), *Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico*, Revista ALCONPAT, 7 (2), 135-147, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>.

- Kaur, G., Pal Singh, S. (2012), *Flexural performance of fibrous concrete with cement additions*, Construction Materials, 167, 14-25, <http://dx.doi.org/10.1680/coma.12.00008>.
- Kuehl, R. O. (2000), *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, Arizona.
- Li, H., Li B., Jin, R., Li, S., Yu, J. G. (2018), *Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams*, Construction and Building Materials, 169, 179–187.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A. (2019), *Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review*, Construction and Building Materials, 200, 490–501, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Solgaard, A., Edvardsen, C., Michel, A. (2021), *Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet–Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide*, Materials, 14, 2642, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14102642>.
- Marcos-Meson, V., Geiker, M., Fischer, G., Solgaard, A., Jakobsen, U. H., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A., Danner, T. (2020), *Durability of cracked SFRC exposed to wet-dry cycles of chlorides and carbon dioxide – Multiscale deterioration phenomena*, Cement and Concrete Research, 135, 106120, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106120>.
- Meza, A., Shaikh, F. U. A. (2020), *Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement*, Constr. Build. Mater, 265, 120331, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>.
- Meza, A., Pujadas, P., Meza, L. M., Pardo-Bosch, F., López-Carreño, R. D. (2021), *Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study*, Materials, 14-240, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14020240>.
- Meza, A., Siddique, S. (2019), *Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber*, Construction and Building Materials, 213, 286–291, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>.
- Michel, A., Solgaard, A. O. S., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., Olesen, J. F. (2013), *Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete*, Corrosion Science, 77, 308–321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.019>.
- Nguyen, W., Duncan, J. F., Jen, G., Ostertag, C. P. (2018), *Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete*, Corrosion Science, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.004>.
- Paul, S. C., Van Zijl, G. P., Branko Šavija, B. (2020), *Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review*, Materials, 13, 4562, <http://dx.doi.org/10.3390/ma13204562www>.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015), *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*, Tecnología en Marcha, 28, 127-136.
- Simões, Y. S., Santo, C. F. R. (2019), *Contribución de las vigas de concreto armado degradadas por la acción del fuego: Análisis comparativo entre el refuerzo estructural con fibras de carbono y láminas metálicas*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 48 – 64, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.259>.
- Tang, K., Wilkinson, S. (2020), *Corrosion resistance of electrified railway tunnels made of steel fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials, 230, 117006, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117006>.
- Taqi, F. Y., Mashrei, M. A., Oleiwi, H. M. (2021), *Experimental study on the effect of corrosion on shear strength of fibre-reinforced concrete beams*, Structures, 33, 2317-2333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.006>.
- Zhang, P., Kang, L., Wang, J., Guo, J., Hu, S., Ling, Y. (2020), *Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature—A Review*, Applied Sciences, 10, 2324, <http://dx.doi.org/10.3390/app10072324>.

Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación

M. Navarrete-Seras^{1*} , W. Martinez-Molina¹ , H. L. Chavez-Garcia¹ ,
A. Sanchez-Calvillo^{1,2} , M. Arreola-Sanchez^{1,4} , J. A. Borrego-Perez^{1,4} ,
N. A. Perez-Castellanos^{4,5} , R. P. Ruiz-Torres⁶ , A. M. Duran-Ramos¹,
E. M. Alonso-Guzman^{1,3*} 

*Autor de Contacto: mnavarrete@umich.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

Recibido: 01/04/2023 | Correcciones recibidas: 16/04/2023 | Aceptado: 19/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

Se analizó la influencia de la proporción de arena en morteros Tipo II según norma N-CMT-2-01-004/02 empleando tres tipos de áridos de la región de Morelia, Michoacán determinando su influencia en sus propiedades físico-mecánicas, contemplando el uso de diferentes materiales cementantes (MC): el cemento Portland más cal (B1), cemento Portland más cemento de albañilería (B2). Se elaboraron mezclas para B1 y B2 con relaciones en volumen arena/MC, desde 2.25 hasta 4, determinando la fluidez, resistencia a compresión uniaxial (UCS) y resistividad eléctrica húmeda (WER). Se estudió la relación entre la fluidez y la cantidad de agua/MC, concluyendo que el tipo de árido y proporciones modifican la fluidez y demanda de agua en estado fresco impactando en UCS y WER.

Palabras clave: morteros de construcción; resistividad eléctrica; agregados finos; resistencia mecánica, granulometría.

Citar como: Navarrete-Seras, M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Sanchez-Calvillo, A., Arreola-Sanchez, M., Borrego-Perez, J. A., Perez-Castellanos, N. A., Ruiz-Torres, R. P., Duran-Ramos, A. M., Alonso-Guzman, E. M. (2023), “Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 158 – 174, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

¹ Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

² Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB), Universitat de Lleida, Lleida, Spain, 25002.

³ PIDA, Faculty of Architecture, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040.

⁴ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

⁵ Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, Coyoacán, CDMX, México, 04510.

⁶ Faculty of Architecture, UNACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29050.

Contribución de cada autor

En este trabajo la experimentación fue llevada a cabo por M. Navarrete-Seras (50%), A.M. Duran-Ramos (50%); la actividad de búsqueda bibliográfica M. Navarrete-Seras (25%), A.M. Duran-Ramos (25%), A. Sanchez-Calvillo (25%) y E.M. Alonso-Guzman (25%); la actividad de extracción de información por W. Martinez-Molina (20%), J.A. Borrego-Perez (20%), H.L. Chavez Garcia (20%), E.M. Alonso-Guzman (20%) y M. Arreola-Sanchez (20%); análisis y discusión de resultados por M. Navarrete (20%), W. Martinez-Molina (20%), M. Arreola-Sanchez (20%), J. A. Borrego-Perez (20%) y H.L. Chavez García (20%); la redacción del documento por A. Sanchez-Calvillo (20%), N.A. Perez-Castellanos (20%), R.P. Ruiz-Torres (20%), W. Martinez-Molina (20%) y M. Arreola-Sanchez (20%); la revisión del texto por A.M. Duran-Ramos (20%), N.A. Perez-Castellanos (20%), R.P. Ruiz-Torres (20%), M. Navarrete-Seras (20%) y E. M. Alonso-Guzman (20%); el diseño de figuras y la adaptación al formato por W. Martinez-Molina (25%), H. L. Chavez-Garcia (25%), M. Arreola-Sanchez (25%) y J.A. Borrego-Perez (25%); traducción al Inglés por A. Sanchez-Calvillo (60%), N.A. Perez-Castellanos (20%) y R. P. Ruiz-Torres (20%).

Influence of sand proportion in the physical and mechanical properties of construction and building mortars

ABSTRACT

The influence of sand proportion of in mortars Type II was studied according to the standard N-CMT-2-01-004/02. Three different types of fine aggregates from the region of Morelia, in Michoacan, were used to determine their influence in the physical and mechanical properties. Different cementitious materials (CM): Portland cement plus lime (B1), and Portland cement plus construction cement (B2) were considered and mixed. The mortar mixtures were designed for B1 and B2 with different volume ratios of aggregates/CM, from 2.25 to 4. The characterization determined the fluency, the uniaxial compressive strength (UCS) and the wet electrical resistivity (WER). Analyzing the fluency and the ratio water/CM it was concluded that the aggregate properties and their proportions modify the water demand in the fresh state of the mortar and consequently the UCS and WER.

Keywords: construction mortars; electrical resistivity; fine aggregates; mechanical resistance; sieve analysis.

Influência da proporção de areia nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para construção

RESUMO

As proporções de areia nas argamassas de tipo II foram analisadas de acordo com a norma N-CMT-2-01-004/02. Foram utilizados três tipos de agregados da região de Morelia, Michoacán para determinar a sua influência nas suas propriedades físico-mecânicas. Considerando a utilização de diferentes materiais cimentícios (CM): cimento Portland mais cimento de alvenaria (B2) e cimento Portland mais cal (B1). Foram preparadas misturas para B1 e B2 com relações areia/MC de 2,25 para 4. Foram determinadas a fluidez, resistência uniaxial à compressão (UCS) e resistividade elétrica úmida (WER). Estudando a relação entre a fluidez e a quantidade de água/MC, concluindo que o tipo de agregado e as proporções modificam a fluidez e a demanda de água no estado fresco com impacto no UCS e no WER.

Palavras-chave: argamassas de construção; resistividade elétrica; agregados finos; resistência mecânica, dimensão das partículas.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, los edificios residenciales y la vivienda han sido edificados con distintos materiales de construcción como rocas regulares e irregulares, ladrillos cerámicos, madera o bloques de tierra cruda entre otros muchos. Estos muros y pisos usualmente cuentan con morteros de unión tanto para las mamposterías o aplanados para recubrir estos sistemas (Álvarez Galindo et al., 1995). Los morteros son mezclas que incorporan conglomerantes inorgánicos, agregados, agua y otros elementos usados como aditivos. Los principales objetivos de estos sistemas son unir los elementos constructivos, llenar los espacios vacíos como agentes de relleno, y proteger las superficies y los distintos sistemas de los agentes externos (Sánchez Tizapa et al., 2017; Wu et al., 2021).

En la Antigua Roma, los contenedores donde se transportaban las mezclas de cal en pasta y arena solían ser llamados “mortarius”, y con el tiempo el término derivó hasta al actual “mortero” con el que se designa al elemento. Encontramos los primeros registros de la mención de los morteros en Vitrubio, que detalla el proceso de selección y producción a partir de la roca caliza para su uso en edificación (Navarro-Mendoza et al., 2023). Estos sistemas tradicionales fueron usados por siglos para la construcción de cimentaciones, muros de carga, pavimentos y revestimientos de todo tipo hasta la popularización del cemento Portland (Álvarez Galindo et al., 1995; Navarro-Mendoza et al., 2020).

Los morteros han tenido múltiples usos en la construcción a lo largo del tiempo; por ejemplo, en los edificios pueden ser utilizados por sus propiedades térmicas y acústicas, también para evitar la proliferación de fauna o flora nociva o problemática, o incluso para lograr ciertas propiedades estéticas. Respecto a su función adhesiva, los morteros requieren alcanzar resistencias mecánicas adecuadas para permitir que las mamposterías de elementos estructurales puedan soportar las cargas necesarias. Antes del surgimiento del cemento moderno de construcción, en México, los artesanos y constructores solían adicionar cal a la mezcla para incrementar los tiempos de colocación y aplicación de los morteros. La cal tenía la función de retener el agua para permitir la correcta hidratación y curado interno. Este tipo de mezclas, resultado de la experiencia en los trabajos, recibe el nombre de mortero terciado, debido a los tres elementos empleados: cemento, cal y agregados. Actualmente el cemento de albañilería ha desplazado de manera importante el uso de la cal más cemento Portland.

El mortero es un producto fácil de elaborar, ya que los elementos necesarios (agua, aglutinantes y arena) para hacer la mezcla son asequibles y la aplicación del sistema es simple. Sin embargo, los usuarios han subestimado la importancia de usar proporciones adecuadas de los componentes, y esta situación ha generado que aparezcan problemas como la disminución de la resistencia y la adherencia, deterioros estructurales, o la contracción que provoca la aparición de fisuras que reducen la vida útil de los morteros (Jacques et al., 2023; Li et al., 2023). En muchos casos, las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de los bancos son desconocidas, siendo los precios más bajos los que determinan la selección del material.

La clase y las proporciones empleadas de los materiales que constituyen los morteros tienen influencia en las propiedades en estado fresco (Giordani & Masuero, 2019), y consecuentemente, el comportamiento en estado endurecido (Haach et al., 2011). Una de las características más deseadas durante el estado fresco es la trabajabilidad, que debe adecuarse a los requisitos de ejecución de los recubrimientos o aplanados para garantizar una buena adhesión a la superficie (Ribeiro & Oliveira Rey, 2019; Tena et al., 2017). Algunos elementos que afectan directamente las propiedades del mortero son las materias primas como las arenas y su calidad. Por este motivo, el análisis reológico es fundamental para determinar si los agregados cumplen con las normativas establecidas y si sus cualidades están afectando a la viscosidad y trabajabilidad de los morteros (Danish & Ozbakkaloglu, 2023; Li et al., 2022; Westerholm et al., 2008).

Normalmente, los agregados finos (FA, por sus siglas en inglés) representan alrededor del 35% del volumen total del mortero, siendo uno de los componentes más importantes en la mezcla. Por lo tanto, el empleo de distintos tipos de arena con geometrías irregulares y una ineficiente distribución granulométrica puede resultar en un deterioro de las propiedades de fluidez, reduciendo la densidad y aumentando el área superficial específica haciendo que la pasta reduzca a su vez su grosor (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). La morfología de los agregados finos también juega un papel importante en las propiedades físicas del mortero debido al impacto directo en la reología (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

Varios estudios han tratado de analizar la importancia de los FA y su sustitución parcial en las mezclas de mortero. Se ha reportado cómo el uso de agregados finos incrementó en un 30% la viscosidad plástica de los morteros (Hu, 2005); otras investigaciones han comparado la afectación en el desempeño de morteros de cemento Portland con la adición de geopolímeros con partículas residuales de vidrio (Gao et al., 2022); el efecto de la carbonatación también fue estudiado mediante la adición de diferentes materiales de residuo con propiedades cementantes y/o puzolánicas como sustitución del cemento Portland, determinando si éstos pueden limitar o mejorar la carbonatación de las mezclas al endurecer (Martínez-Molina et al., 2021).

Otros trabajos investigaron la idoneidad del plástico reciclado como sustitución del FA reportando una reducción del 10 al 20 % en la resistencia a compresión y a la tensión directa (Ullah et al., 2021). La influencia de la adición de fibras también ha sido analizada en las propiedades en estado fresco, la deformabilidad y el comportamiento mecánico (Brazão Farinha et al., 2021); además, los efectos de adiciones como humo de sílice, superplastificantes, y la relación agua/aglutinante también han sido estudiados (Senff et al., 2009). La sustitución parcial de la masa de cemento Portland por carbonato de cal en polvo (0, 9, 16, 23 y 30 %) también ha demostrado afectación en las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad (Souza et al., 2020), así como la cáscara de huevo triturada (Beng Wei et al., 2021), o las puzolanas naturales (HAMMAT et al., 2021).

La problemática descrita en torno a la importancia de los agregados finos en los morteros, aunado a la ambigüedad descrita en la normatividad mexicana (NMX-C-486-ONNCCE-2014 y N-CMT-2-01-004/02) con relación a las proporciones de cementante y agua para la correcta trabajabilidad del mortero, dan paso a este trabajo de investigación. Se debe tomar en cuenta que esta investigación se realizó con bancos de agregados finos de una zona de México en particular (Morelia). La importancia de este trabajo radica en visualizar las diferencias que pueden existir en la trabajabilidad y el estado endurecido del mortero al utilizar diferentes bancos de agregados en una misma zona, además de la confiabilidad y calidad en el mortero actualmente usado como recubrimiento estructural.

La presente investigación se enfoca en el estudio de todo el rango de relaciones cementante/arena que permita la normatividad mencionada anteriormente, para determinar la cantidad máxima de arena que puede usarse para producir un mortero de uso estructural, además de estudiar tres tipos de arenas naturales, FA, con distintas dosificaciones de cemento hidráulico (cemento Portland), cemento de albañilería y cal, para analizar la influencia de la proporción de arena en las propiedades físico-mecánicas. Estas mezclas fueron caracterizadas con técnicas de análisis no destructivas y con ensayos mecánicos como la resistencia a compresión; para evaluar las mejores mezclas en función de los requerimientos de las normativas nacionales e internacionales. Todo esto, con la finalidad de incrementar el conocimiento técnico y científico sobre los morteros usados comúnmente en la edificación y construcción de infraestructura, para con ello lograr impactar positivamente en su calidad y durabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los morteros fueron diseñados tanto para ser aplicados en el interior como en el exterior de

edificios, particularmente para su uso en vivienda residencial autoconstruida. La norma N-CMT-2-01-004/02 para morteros de mampostería define tres clases: I, II y III, en función de los componentes y los valores mínimos de resistencia mecánica. Las mezclas se diseñaron para morteros de Tipo II, siendo combinaciones volumétricas de cemento hidráulico, cemento de albañilería y cal, con distintas cantidades de arena para determinar los mejores desempeños. La proporción de arena en ningún caso fue menor a 2.25 o superior a 4 veces la suma de los materiales cementantes en volumen, como lo indica la normativa antes comentada.

Para esta investigación, toda la experimentación se realizó en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana, empezando por el control de calidad de todos los materiales en forma individual. Se utilizó cemento CPC 30R RS, según la NMX-C-414-2017-ONNCCE, que se clasifica como Tipo II según la norma ASTM C150-C150M-22 (ASTM International, 2022c). Por otro lado, la cal cumple con la norma ASTM E1266-20 (ASTM International, 2020b). Las arenas fueron muestreadas de bancos de la Región Morelia, de Michoacán, en México, y analizadas en el laboratorio, siempre como el promedio de tres ensayos. La caracterización física de las arenas se efectuó mediante lo indicado por los estándares internacionales de la American Society of Testing Materials (ASTM), y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) de México.

Una vez elaboradas las mezclas, se determinó la fluidez en estado fresco, y una vez endurecidas fueron ensayadas para obtener las propiedades mecánicas como la Resistencia a Compresión Uniaxial (UCS) considerando la resistencia mínima de diseño de 75 kgf/cm^2 requerida por la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014); otras características fueron extraídas mediante el uso de Ensayos No-Destructivos (NDT), como la Resistividad Eléctrica Húmeda (WER) a 7 y 28 días de edad.

2.1 Diseño de las mezclas

Todos los especímenes del mortero Tipo II, acorde a las normativas, fueron preparados bajo condiciones de laboratorio con distintas dosificaciones volumétricas de cemento hidráulico, cemento de albañilería y cal, y arena como se muestra en la tabla 1. Todas las mezclas se mantuvieron en el rango de fluidez 105-130 % (ONNCCE, 2015b). Posteriormente, se curaron en inmersión en agua según se indica en la norma ASTM C31-C31M-22 (ASTM 2022a), siendo el agua obtenida de la red pública del campus de la UMSNH. La mitad de los morteros (B1) fueron preparados con cemento hidráulico, cal y arena, realizándose 6 especímenes para cada una de las 8 distintas proporciones, obteniéndose 48 muestras; mientras que la otra mitad (B2) incorporó cemento hidráulico, cemento de albañilería y arena, realizándose la misma cantidad de 48 especímenes que (B1), para obtener un total de 96 muestras a ensayar, primero en forma no destructiva obteniendo WER y después destructivamente hasta la falla para obtener UCS. ;

Tabla 1. Diseño de las mezclas y proporciones en volumen.

ID	Cemento hidráulico (cemento Portland)	Cemento de Albañilería (Cemento para construcción)	Cal	Arena
B1	1	-	$\frac{1}{2}$	2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4
B2	1	1	-	2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4

2.2 Caracterización y propiedades de los agregados finos

Las arenas fueron extraídas de bancos de material en el estado de Michoacán, en México. El estado está situado en el Eje Neovolcánico, donde abundan las rocas ígneas extrusivas y los materiales de origen silíceo, como los agregados de río o las arenas de cuarzo. Los tres agregados utilizados para

la investigación son arenas naturales sin triturar. En primer lugar, el banco “El Coro” (CH) del municipio de Zinapécuaro, cerca del lago Cuitzeo, en latitud 19.893889 y longitud -100.875833; después, el banco “El Cuervo” (R), del río Huajúmbaro en la depresión del Balsas, en latitud 19.626110 y longitud -100.636667; finalmente, el banco “Joyitas” (J), en Morelia, en latitud 19.727222 y longitud -101.385278. Las tres arenas se muestran en la figura 1.



Figura 1. Arenas: (a) Arena volcánica de Joyitas (J); (b) Arena limosa de El Coro (CH); (c) Arena de río de El Cuervo (R). Fuente: (Durán, 2021; Durán, 2021; Mondragón, 2021).

Las arenas se muestrearon en los bancos mencionados y se transportaron al laboratorio de materiales para su análisis. En primer lugar, se secaron y prepararon como muestras representativas (100 kg) para empezar el proceso de diseño de los morteros. Los geomateriales no cuentan con el mismo control de calidad estricto que tiene el cemento, debido a su origen natural; en cambio, es común que los morteros se produzcan en base a la experiencia de los usuarios, artesanos y constructores. La tabla 2 presenta el conjunto de métodos de caracterización que se aplicaron en las tres arenas utilizadas en la investigación antes de efectuar los morteros (ASTM International, 2017, 2018, 2019b, 2022b; ONNCCE, 2004, 2006, 2020).

Tabla 2. Métodos de ensayo aplicados a los agregados de cada banco de materiales

Método de ensayo	Norma	R	CH	J
Standard Practice for Sampling Aggregates (kg)	ASTM D75/D75M-19	100	100	100
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (g/cm ³) Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo (g/cm ³)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	2.22	2.13	2.40
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (%) Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo (g/cm ³)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	7.02	5.92	4.75
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³) Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-073-ONNCCE	1.18	1.23	1.36
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³) Agregados para Concreto - Partículas más Finas que la Criba 0,075 mm (No. 200) por Medio de Lavado – Método de Prueba (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-084-ONNCCE	1.28	1.36	1.42
Standard Specification for Concrete Aggregates (Módulo de Finura)	ASTM C33-C33M-18	3.51	2.98	3.87

* La densidad y la absorción se separaron en la tabla anterior, pero corresponden a las mismas normas.

Se calculó la densidad aparente de las arenas, con resultados muy similares para las tres (ASTM, 2017); por otro lado, CH presentó un coeficiente de absorción superior al 7%, mientras que el de J fue de 4.75%, siendo este un aspecto relevante. Esta condición puede tener una afectación directa en las propiedades del mortero, incrementando la demanda de agua y consecuentemente disminuyendo la resistencia a compresión.

La figura 2 presenta las curvas granulométricas de las distintas arenas, representando los límites inferiores y superiores de diseño (ASTM International, 2018), mostrando como R se adapta perfectamente a las curvas propuestas; por otro lado, CH presenta un exceso de material fino en el rango de 0.1 a 0.4 mm aproximadamente, mientras que J sobrepasa ligeramente el límite inferior. Estas condiciones pueden tener consecuencias en las propiedades de los morteros como la fluidez y la demanda de agua en estado fresco, como puede observarse más adelante en las figuras 6 y 7.

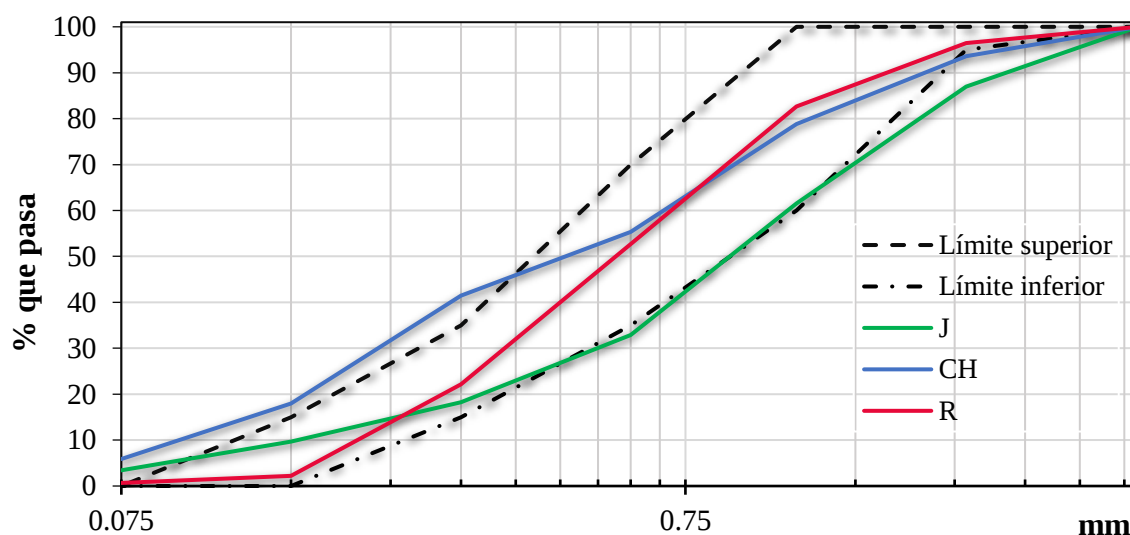


Figura 2. Curvas granulométricas de los agregados.

2.3 Métodos de ensayo aplicados a las mezclas de mortero

La tabla 3 muestra el conjunto de métodos de ensayo y pruebas realizadas para la caracterización de las mezclas de mortero en estado fresco y endurecido. Se siguieron tanto las normativas internacionales como las mexicanas (ASTM y ONNCCE) para analizar las dos combinaciones de diseño. Adicionalmente, los tres métodos de ensayo y su procedimiento se detallarán en el siguiente apartado (ASTM International, 2019a, 2020a, 2021; ONNCCE, 2014, 2015a, 2019).

Tabla 3. Métodos de ensayo aplicados a los morteros.

Métodos de ensayo	Norma	Condiciones
Esfuerzo de Compresión Uniaxial (UCS)	ASTM C109/C109M-21 NMX-C-486-ONNCCE-2014	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Resistividad Eléctrica Húmeda (WER)	ASTM C1876-19 NMX-C-514-ONNCCE-2016	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Consistencia de las mezclas y pastas para mortero base cemento portland	ASTM C305-20 NMX-C-061-ONNCCE-2015	Mezcla en estado fresco

2.3.1. *Fluidez*

El ensayo de fluidez (ver figura 3) permite determinar la trabajabilidad del mortero en estado fresco en función del contenido de agua utilizado, según la ecuación 1. La prueba infiere la consistencia de la mezcla, así como la idoneidad de aplicación para cada técnica. Los límites de aceptación de la prueba varían entre 105-130%, que es el incremento del diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original del mortero ensayado.

$$Fluidez (\%) = \frac{\text{diámetro extendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \times 100 \quad (1)$$



Figura 3. Ensayos en las mezclas de mortero: (a) Moldeado; (b) Consistencia; (c) Adherencia.

Fuente: (Durán, 2021).

2.3.2. *Resistividad Eléctrica Húmeda (WER)*

WER es un método alternativo para evaluar la homogeneidad de matrices de concreto, permitiendo obtener información relevante del desempeño del material sin comprometer físicamente la estructura, siendo un NDT. El ensayo se realizó según las normas NMX-C-514-ONNCCE y ASTM C1876-19 (ver figura 4). El procedimiento se basa en la Ley de Ohm, que indica que la resistividad eléctrica es recíproca a la conductividad, siendo una propiedad volumétrica de los materiales que indica la resistencia al paso de corriente eléctrica. WER se representa con la ecuación 2, donde R es la resistividad eléctrica en kΩ-cm, l es la longitud del espécimen en cm y A es el área en cm².

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$



Figura 4. Equipo de resistividad eléctrica Nillson 400.

2.3.3. *Resistencia a Compresión Uniaxial (UCS)*

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cúbicos de 50 mm (ver figura 5) según las normas NMX-C-486-ONNCCE y ASTM C109/C109M-21. La UCS se obtiene mediante la ecuación 3, donde W es la carga máxima en kgf que soporta el cubo, y A es el área de contacto en cm² del espécimen.

$$UCS = \frac{W}{A} \quad (3)$$



Figura 5. Máquina Universal de Pruebas, Resistencia a compresión uniaxial (UCS).

3. RESULTADOS

La investigación analizó las propiedades de tres bancos de arena en mezclas de mortero y sus distintas proporciones de diseño. La figura 6 muestra la comparación entre la fluidez de las mezclas con los tres agregados y la relación volumétrica entre el contenido de agua/material cementante aplicado en cada uno de los especímenes de mortero B1. Como puede observarse CH y J emplearon la misma cantidad de agua (las curvas se superponen), mientras que R necesitó una menor cantidad coincidiendo con (Hu, 2005). Por otro lado, la figura 7 muestra los resultados para los morteros clase B2; en este caso, cada una de las arenas requirió una dosificación de agua distinta y hasta la proporción 3.25 la cantidad de agua requerida por R también fue la menor correspondiendo con (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021). Como se mencionó anteriormente, los límites de fluidez deben encontrarse en el rango entre 105 y 130 %, cumpliendo con este requisito todas las muestras. Para ambas clases de morteros se comprobó que a mayor proporción de arena se tiene una mayor relación agua/material cementante concordando con la investigación de (Giordani & Masuero, 2019).

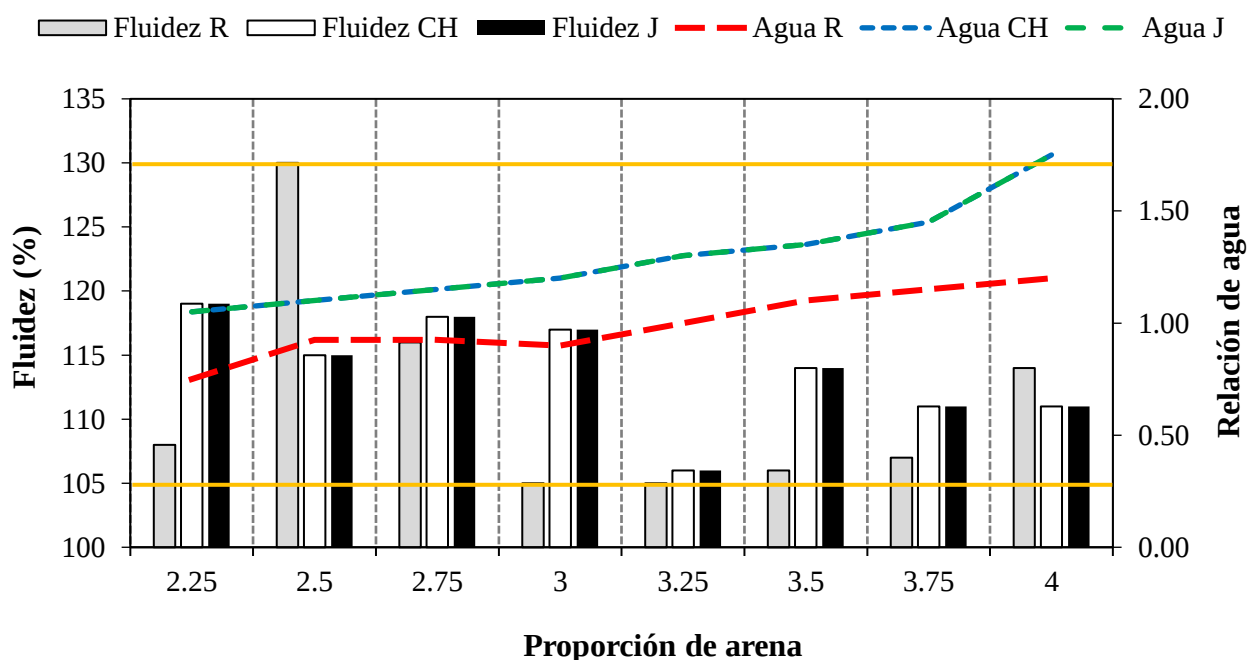


Figura 6. Fluidez y relación volumétrica de agua/cementantes de los morteros B1 (cemento hidráulico: cal: arena).

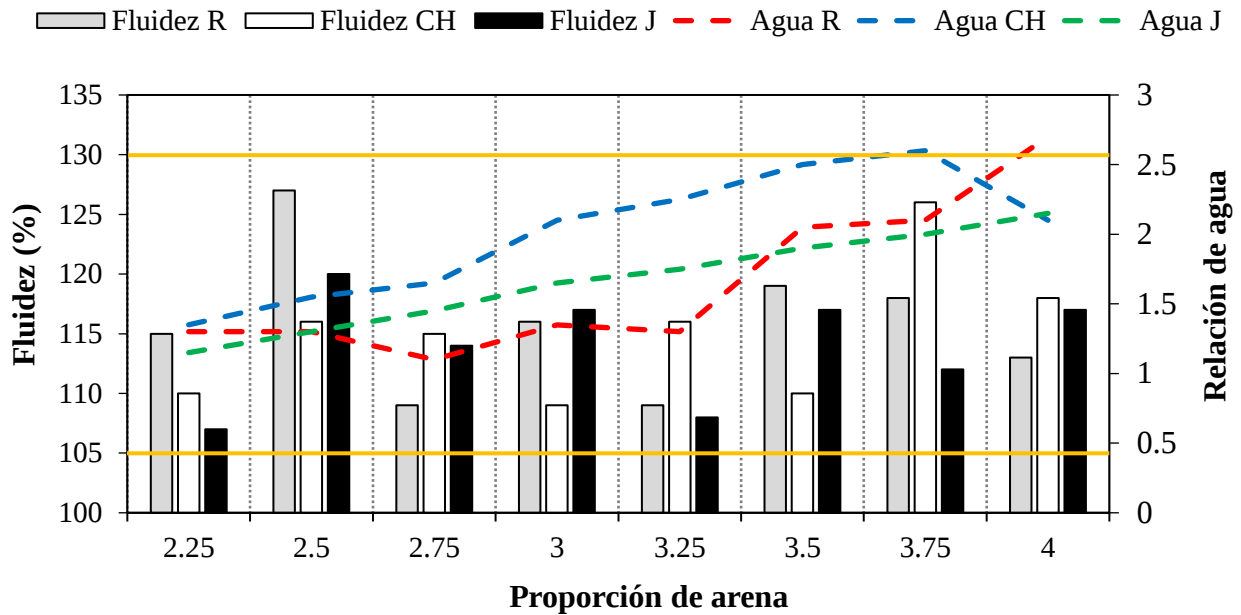


Figura 7. Fluidez y relación volumétrica de agua/cementantes de los morteros B2 (cemento hidráulico: cemento albañilería: arena).

Las figuras 8 y 9 representan los resultados del ensayo WER a 7 y 28 días de edad para los especímenes B1 y B2 respectivamente; podemos comprobar el desempeño de las tres arenas y cómo se comportaron con las distintas mezclas de mortero. El límite mínimo sugerido por la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019 es de 10 kΩ-cm, para mezclas de concreto; un valor inferior podría resultar en una porosidad excesiva, como resultó en todos los casos analizados. Para ambos morteros B1 y B2 las mezclas con la arena CH fueron las que presentaron mayor resistividad eléctrica, sobresaliendo la mayor resistividad en mezclas B2.

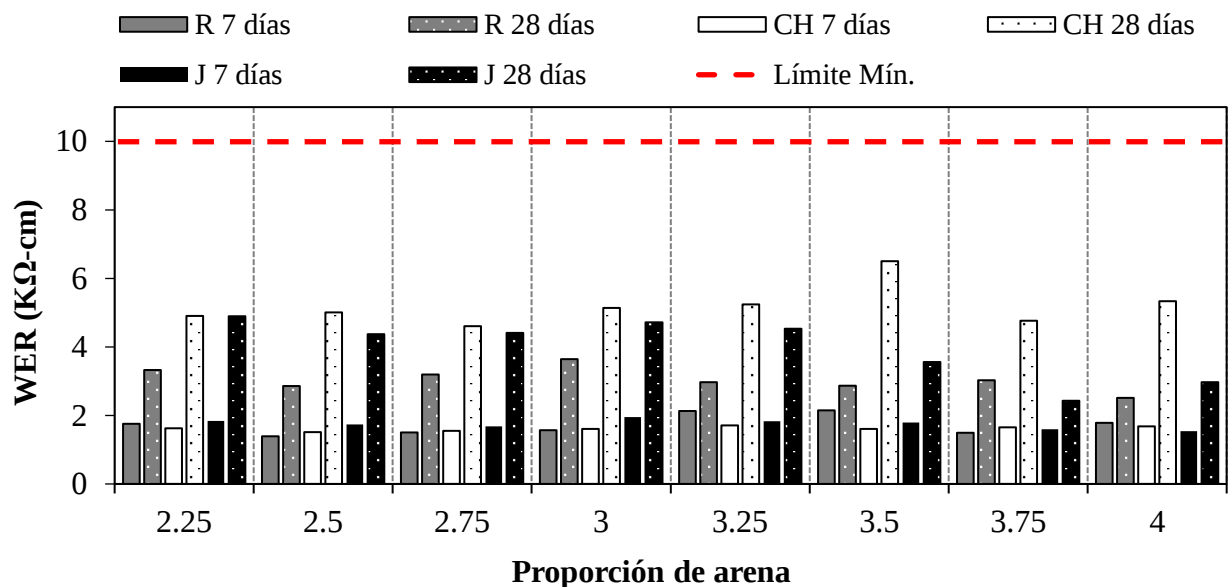


Figura 8. Resistividad eléctrica húmeda (WER) de los morteros B1 (cemento hidráulico: cal: arena) en función de la proporción de arena.

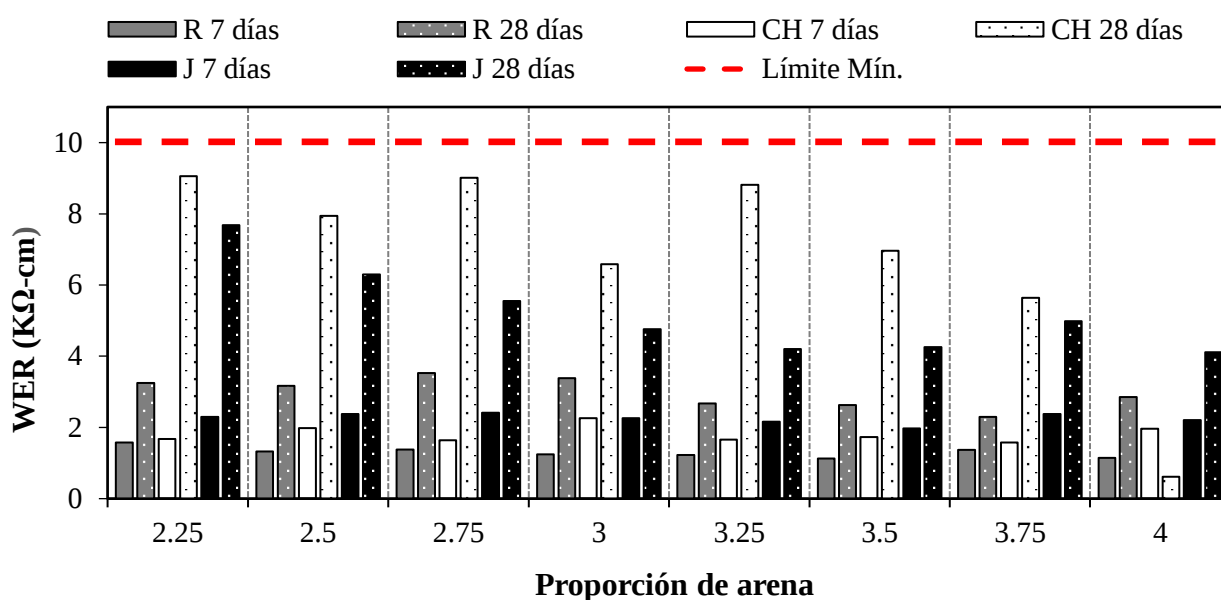


Figura 9. Resistividad eléctrica húmeda (WER) de los morteros B2 (cemento hidráulico: cemento albañilería: arena) en función de la proporción de arena.

Las figuras 10 y 11 muestran la UCS a 7 y 28 días de edad de los morteros B1 y B2 respectivamente, en función de las proporciones en volumen utilizadas (de 2.25 a 4). La resistencia mínima de diseño según la N-CMT-2-01-004/02 es $UCS = 75 \text{ kgf/cm}^2$ (7.5 MPa), considerado la utilización y las aplicaciones de estos morteros.

Como es lógico, los morteros incrementan su resistencia a mayor edad, y las muestras a 28 días reportaron los valores más altos de resistencia estudiados. En general, las proporciones volumétricas de 2.25 a 3 (arena/suma de cementantes) fueron las que funcionaron mejor, ya que para B1 para valores mayores a 3.25 ninguna de las mezclas cumplió con la mínima resistencia requerida de 75 kgf/cm^2 . Podemos apreciar como los morteros B1 tuvieron un mejor desempeño, con una mayor cantidad de especímenes alcanzando la resistencia mínima, en concordancia con lo reportado por (Souza et al., 2020; Beng Wei et al., 2021; HAMMAT et al., 2021). Para los morteros B1 el mejor agregado fue R, mientras que para los morteros B2 fue J.

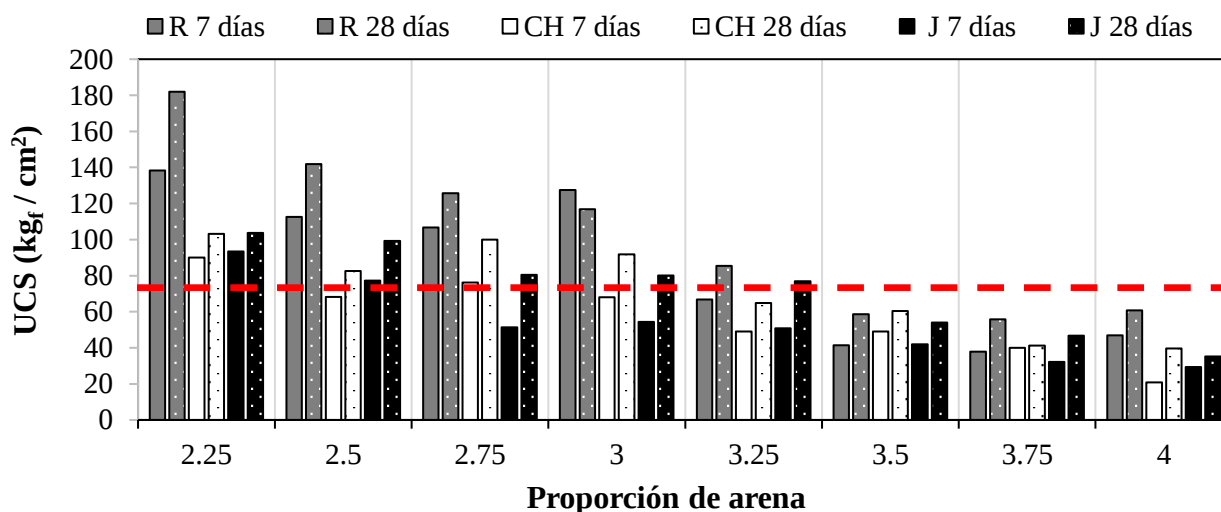
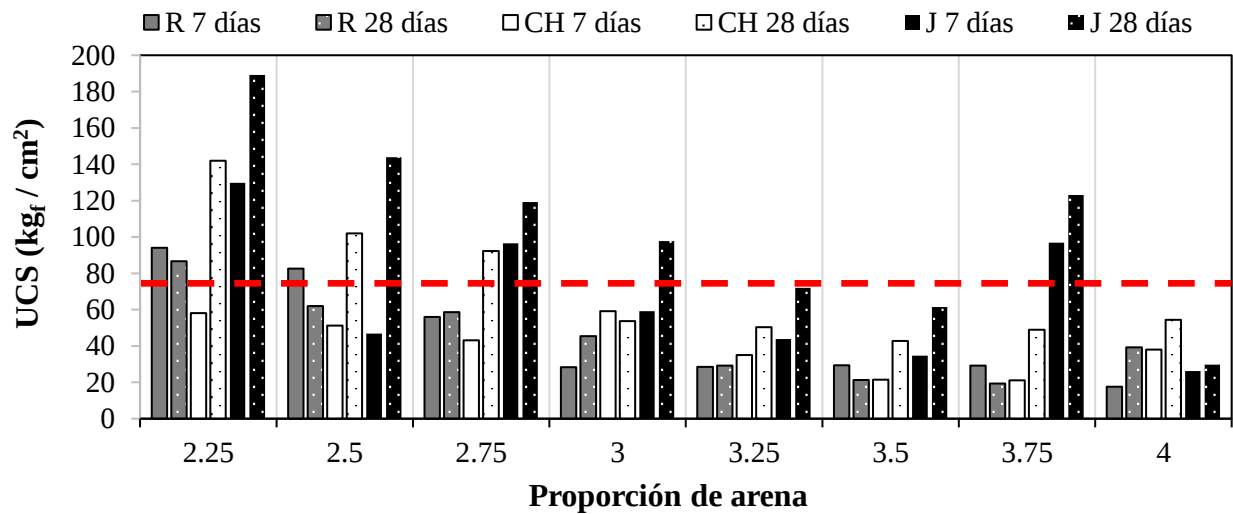
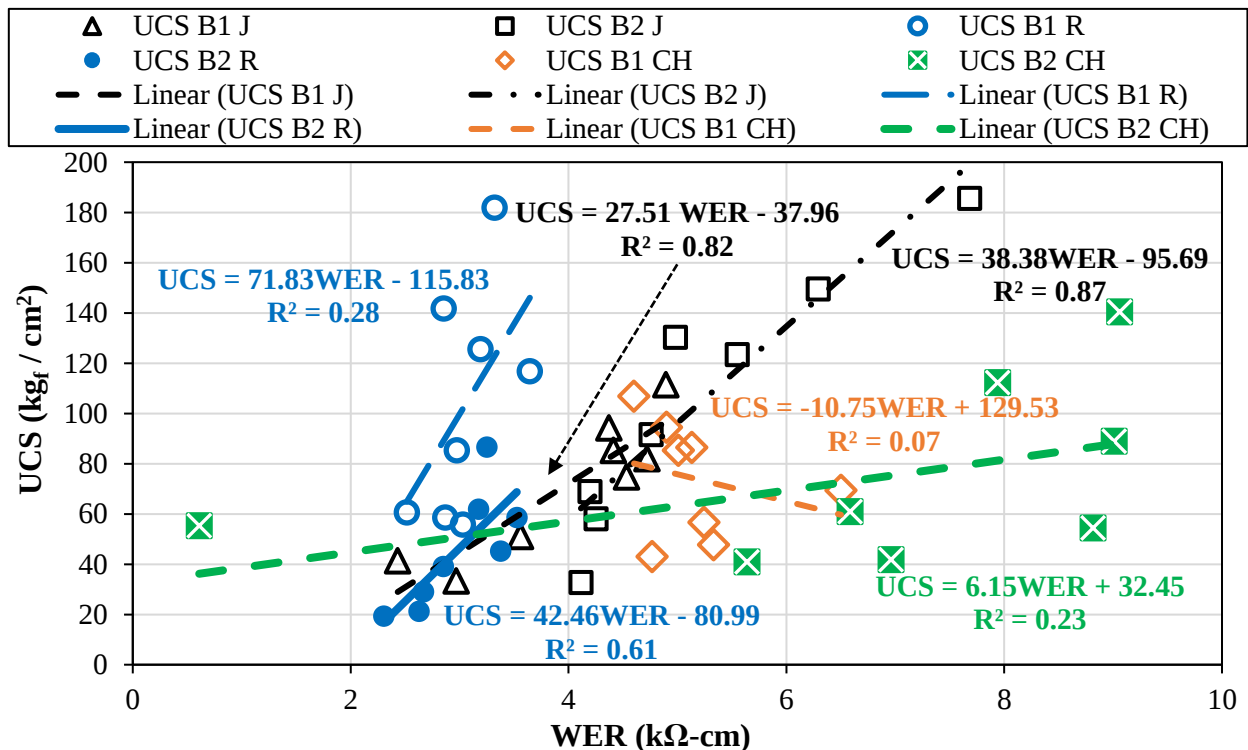


Figure 10. Resistencia a compresión de los morteros B1 en función de la proporción volumétrica de arena/suma de cementantes.



La figura 12 muestra la correlación entre los resultados de UCS y WER a 28 días de edad para todos los morteros diseñados. El agregado J es el que obtuvo el mejor coeficiente de correlación $R^2 = 0.87$ para los morteros clase B2, y $R^2 = 0.82$ para los morteros clase B1. Esta gran correlación entre los métodos de ensayo puede ligarse a la baja absorción y alta densidad del material, además de su correcta distribución mostrada en la curva granulométrica según lo especificado por la norma ASTM C-91. Por otro lado, R y CH evidenciaron la menor correlación, especialmente la última. Estos morteros presentaron mayor absorción y más cantidad de material fino en el análisis granulométrico, lo que incrementa la demanda de agua y consecuentemente la relación agua/material cementante, al igual que lo reportado por (Haach et al., 2011).



4. DISCUSIÓN

El banco de Joyitas (J) históricamente ha sido el más explotado y demandado por los artesanos y constructores de la región cercana a Morelia, en Michoacán. Esta arena volcánica oscura, de origen andesítico conforme a los análisis granulométricos, presenta una mayor cantidad de material fino y un ligero exceso de granos gruesos que quedan retenidos en las mallas ASTM 16 y 30, generando un mejor comportamiento mecánico respecto a los otros dos bancos. Además, J presentó mayores valores de densidad y una menor absorción de agua, justificando la elección de los usuarios de la región.

El proceso de caracterización permitió evaluar las tres distintas arenas y determinar cómo se comportan para cada tipología de mortero (B1 y B2) y bajo qué proporciones se obtienen los mejores resultados. Es importante entender que además de cumplir con los requerimientos mínimos de diseño, cada mezcla puede ser útil bajo condiciones específicas. La resistividad eléctrica es una NDT novedosa para evaluar la durabilidad de concretos y morteros, además de inferir la porosidad, mientras que toda esta información puede ser correlacionada con el análisis granulométrico y el tamaño de partícula de las arenas estudiadas. Bajo este supuesto la arena CH presentó los valores de resistividad eléctrica más elevados, a la vez que reportó considerables cantidades de material fino retenido en las mallas ASTM 100 y 200, y éstos actúan como fillers/llenadores de poros, sellando la porosidad de las mezclas y obstaculizando la permeabilidad de los iones despasivantes que pudieran reducir la durabilidad de las estructuras de mezclas concreto/mortero armados, abonando a lo reportado por (Giordani & Masuero, 2019; Haach et al., 2011; Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

Las proporciones más bajas de arena lograron el mejor comportamiento mecánico a la vez que cumplieron correctamente con los valores de diseño por fluidez. Con respecto a la resistividad eléctrica, todos los valores encontrados estuvieron por debajo de los 10 k Ω -cm según la NMX-C-514-2019, aunque este parámetro es para mezclas de concreto, por haberse diseñado las mezclas de mortero con altos valores de relación agua/material cementante, según se puede observar en las figuras 8 y 9, debido a la necesidad de tener una fluidez necesaria para la correcta trabajabilidad de los morteros en la obra, recordando que sus prestaciones deben estar dirigidas a la buena adherencia con la mampostería, ya sea como adhesivo o como recubrimiento. Adicionalmente, se corroboró que la proporción de arena tiene una correlación directa con la demanda de agua, resultando en un incremento de la relación agua/material cementante. Por lo tanto, los mejores y más adecuados morteros son aquellos con proporciones de arena bajas sin tener en cuenta su tipología y productos cementantes, en coincidencia con (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). Es interesante comprobar como los morteros B1 lograron un desempeño satisfactorio para todos los métodos de ensayo, tomando en cuenta que se elaboraron con cal, un material que ha sido reportado con bajas resistencias (Souza et al., 2020) y sustituido con asiduidad por el cemento hidráulico o cemento Portland. Pese a que su comportamiento mecánico fue más bajo, las mezclas B1 generalmente demandan menos cantidad de agua que las mezclas B2, a la vez que alcanzan los mismos requisitos de fluidez, siendo éste un aspecto a considerar.

La técnica WER ha demostrado ser de gran utilidad para la caracterización de materiales y componentes y la evaluación de su durabilidad. Los excelentes coeficientes de correlación R^2 de J muestran como la densidad, la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica se correlacionan en alto grado. El coeficiente entre UCS y WER está ligado fuertemente a la absorción y densidad de los agregados finos; cuando estas dos variables incrementan, el coeficiente variará fuertemente, con una importante dispersión de los datos. Por esta razón, es esencial combinar los NDT con ensayos de resistencia mecánica para contar con una mejor comprensión y entendimiento de los materiales de construcción.

Según la normatividad el MF para la arena empleada en morteros para la edificación se encuentra

entre el rango de 1.6 a 2.5 (de más fina a más gruesa). Las tres arenas estudiadas cumplen con este parámetro. Según la granulometría, la arena de El Coro (CH) presenta el menor Módulo de Finura de las tres arenas estudiadas, con un valor de 2.06, teniendo además ligero exceso de finos, según la Figura 2, lo que puede influir para que estos se comporten como filler obturando la porosidad y, por lo tanto, incrementando la Resistividad en ambas mezclas B1 y B2, repercutiendo así en una mayor durabilidad de esta mezcla de mortero a los 28 días, acentuándose este comportamiento en mezclas B2.

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que en los morteros estudiados la cantidad de agua empleada se incrementa conforme aumenta el consumo de materiales cementantes y de los agregados finos, como se esperaba. En ambas mezclas B1 (cemento hidráulico: cal: arena) y B2 (cemento hidráulico: cemento de albañilería: arena), al reducirse la proporción volumétrica de arena/material cementante se incrementó la resistencia a la compresión UCS, así como la fluidez que se mantuvo en el rango de 105 a 130%; en el mismo sentido el consumo de agua/material cementante A/MC, en volumen, se incrementó proporcionalmente en el rango de 1.10 a 1.80 para mezclas B1 y de 1.10 a 2.60 para mezclas B2, teniéndose una menor demanda de agua en mezclas con cal que con cemento de albañilería, sobre todo a mayores proporciones de arena. Respecto a la Resistividad eléctrica WER, a edades tempranas de 7 días ambas mezclas B1 y B2 tuvieron un comportamiento similar, teniéndose un ligero incremento en J sobre CH y R; a los 28 días destaca CH particularmente en mezclas B2, teniendo la proporción arena/material cementante de 2.25 un valor cercano a los 10 k Ω -cm, que es la WER mínima requerida para tener mezclas de concreto hidráulico para considerarse con velocidad de corrosión moderada. En este caso del estudio de morteros al tenerse altos valores de relación agua/material cementante, por la fluidez necesaria de estas mezclas en las obras, no se llegó a valor mencionado. Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se confirma la necesidad de estudiar y caracterizar adecuadamente los materiales usados en la construcción, en especial los composites como los morteros de albañilería, ya que un uso inadecuado de los áridos y de los cementantes puede afectar enormemente la capacidad resistente de dichos morteros. Estos resultados incrementan el conocimiento técnico-científico de los morteros de albañilería, lo que permite a los constructores tomar decisiones acertadas y basadas en estudios formales.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica, CIC, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); así como el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) mediante el proyecto PRONACE 321260: Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat y del Proyecto CF-2023-G-985, Concretos y morteros auto degradantes de biota y compuestos contaminantes presentes en la atmósfera, para su aplicación en vivienda digna de interés social, en ciudades medias mexicanas; el programa SEP-Prodep; y también el apoyo técnico del laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Finalmente, se agradece el apoyo del ingeniero civil Saúl Mondragón Martínez por su colaboración en los ensayos de laboratorio.

7. REFERENCIAS

- Álvarez Galindo, J. I., Martín Pérez, A., García Casado, P. J. (1995). *Historia de los morteros*. Revista PH, 13, 52. <https://doi.org/10.33349/1995.13.263>
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M 17a. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33-C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18
- ASTM International. (2019a). *ASTM C1876-19. Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1876-19>
- ASTM International. (2019b). *ASTM D75/D75M-19. Standard Practice for Sampling Aggregates*. ASTM International.
- ASTM International. (2020a). *ASTM C305-20. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- ASTM International. (2020b). *ASTM E1266-20. Standard Practice for Processing Mixtures of Lime, Fly Ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other Construction Applications*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1266-20>
- ASTM International. (2021). *ASTM C109/C109M-21. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21
- ASTM International. (2022a). *ASTM C31/C31M-22. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-22
- ASTM International. (2022b). *ASTM C128-22. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2022c). *ASTM C150-C150M-22. Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0150-07>
- Beng Wei, C., Othman, R., Yee Ying, C., Putra Jaya, R., Shu Ing, D., Ali Mangi, S. (2021). *Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement*. Materials Today: Proceedings, 46, 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.240>
- Brazão Farinha, C., de Brito, J., Veiga, R. (2021). *Incorporation of high contents of textile, acrylic and glass waste fibres in cement-based mortars. Influence on mortars’ fresh, mechanical and deformability behaviour*. Construction and Building Materials, 303, 124424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124424>
- Danish, A., Ozbakkaloglu, T. (2023). *Impact of nano-silica on the mechanical properties of mortar containing e-waste plastic as fine aggregates*. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.182>
- Durán Ramos, A. M. (2021). *Diseño de mezclas plásticas aglomerantes y su consideración de proporcionamiento por medio del ensayo de fluidez (Bachelor’s Degree Thesis)*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gao, X., Yao, X., Xie, R., Li, X., Cheng, J., Yang, T. (2022). *Performance of fly ash-based geopolymer mortars with waste cathode ray tubes glass fine aggregate: A comparative study with cement mortars*. Construction and Building Materials, 344, 128243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128243>
- Giordani, C., Masuero, A. B. (2019). *Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state*. Construction and Building Materials, 210, 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.077>

- Haach, V. G., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B. (2011). *Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars*. Construction and Building Materials, 25(6), 2980–2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>
- Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P. H., Roussel, N. (2016). *Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars*. Cement and Concrete Research, 80, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>
- Hammat, S., Menadi, B., Kenai, S., Thomas, C., Kirgiz, M. S., Sousa Galdino, A. G. de. (2021). *The effect of content and fineness of natural pozzolana on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar*. Journal of Building Engineering, 44, 103276. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103276>
- Hu, J. (2005). *A study of effects of aggregate on concrete rheology* [Iowa State University, Digital Repository]. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15380>
- Jacques, K. T. J., Zengyao, W., Shoude, W., Shifeng, H., Xin, C. (2023). *The influence of different fine aggregate and cooling regimes on the engineering properties of sulphoaluminate cement mortar after heating*. Case Studies in Construction Materials, 18, e01866. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01866>
- Li, T., Nogueira, R., de Brito, J., & Liu, J. (2023). *Underlying mechanisms of the influence of fine aggregates' content and properties on mortar's plastic viscosity*. Journal of Building Engineering, 67, 106016. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106016>
- Li, T., Zhou, Y., Zhu, J., Liu, J. (2022). *Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar*. Construction and Building Materials, 332, 127362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127362>
- Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Perez-Lopez, T., Alonso-Guzman, E. M., Arreola-Sanchez, M., Navarrete-Seras, M. A., Borrego-Perez, J. A., Sanchez-Calvillo, A., Guzman-Torres, J. A., Perez-Quiroz, J. T. (2021). *Effect of the Addition of Agribusiness and Industrial Wastes as a Partial Substitution of Portland Cement for the Carbonation of Mortars*. Materials, 14(23), 7276. <https://doi.org/10.3390/ma14237276>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Ruvalcaba-Sil, J. L., Sánchez-Calvillo, A., Martínez-Molina, W., García, H. L. C., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Borrego-Pérez, J. A. (2020). *Compressive strength and ultrasonic pulse velocity of mortars and pastes, elaborated with slaked lime and high purity hydrated lime, for restoration works in Mexico*. In Key Engineering Materials: Vol. 862 KEM. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.51>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Sanchez-Calvillo, A., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Navarro-Ezquerria, A., Gonzalez-Sanchez, B., Martinez-Molina, W. (2023). *Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration*. Heritage, 6(3), 2582–2600. <https://doi.org/10.3390/heritage6030136>
- ONNCCE. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica. Método de prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2006). *NMX-C-084-ONNCCE-2006. Industria de la construcción - Agregados para Concreto - Partículas más Finas que la Criba 0,075 mm (No. 200) por Medio de Lavado – Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-486-ONNCCE-2014. Industria de la construcción-Mampostería - Mortero para uso estructural- especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación.
- ONNCCE. (2015a). *NMX-C-061-ONNCCE-2015. Building Industry – Hydraulic Cements – Determination of Compressive Strength of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

- ONNCCE. (2015b). *NMX-C-144-ONNCCE-2015. Building Industry - Hydraulic Cement - Specifications for the Apparatus used in the Flow Test for Mortars made of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019. Building Industry – Electrical Resistivity of Hydraulic Concrete - Specifications and Testing Methods*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020. Industria de la construcción - Agregados para concreto - Determinación de la reactividad potencial*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2002). *N-CMT-2-01-004/02. Characteristics of Materials. Materials For Structures. Materials For Hydraulic Concrete*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ren, Q., Tao, Y., Jiao, D., Jiang, Z., Ye, G., De Schutter, G. (2021). *Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size*. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104163>
- Ribeiro, D. V., Oliveira Rey, R. (2019). *Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Álcalis-Agregado (RAA)*. *Revista ALCONPAT*, 9(2), 185–199. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>
- Sánchez Tizapa, S., Villaseñor Franco, A., Guinto Herrera, E., Barragán Trinidad, R., Mebarki, A. (2017). *Propuesta de valores de referencia para la resistencia de diseño a compresión diagonal y compresión de la mampostería en el estado de Guerrero, México*. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 231–246. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>
- Senff, L., Barbeta, P. A., Repette, W. L., Hotza, D., Paiva, H., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2009). *Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments*. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3107–3111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.028>
- Souza, A. T., Barbosa, T. F., Riccio, L. A., Santos, W. J. dos. (2020). *Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar*. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.024>
- Stolz, C. M., Masuero, A. B. (2018). *Influence of grain distribution on the rheological behavior of mortars*. *Construction and Building Materials*, 177, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131>
- Tena, A., Liga, A., Pérez, A., González, F. (2017). *Proposal for improved mixes to produce concrete masonry units with commonly used aggregates available in the Valley of Mexico*. *Revista ALCONPAT*, 7(1), 36–56. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.170>
- Ullah, Z., Qureshi, M. I., Ahmad, A., Khan, S. U., Javaid, M. F. (2021). *An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete*. *Journal of Building Engineering*, 38, 102177. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102177>
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E. (2008). *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>
- Wu, M., Zhao, Q., Shen, W., Zhao, J., Xu, G., Zhao, D., Xiong, X. (2021). *Mix design of self-leveling mortar prepared by crushed sand with high flowability and early strengthening*. *Construction and Building Materials*, 283, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122679>

Estudio de paneles de hormigón impermeabilizado con aditivo reductor de permeabilidad a base de silicatos

F. E. Z. Alves¹ , R. P. Gurkewicz^{1,2,3*} , E. C. Zancan^{1,2} ,
L. J. J. Nieves^{1,2} , E. G. P. Antunes^{1,2} 

* Autor de Contacto: rafaelpgurkewicz@unesc.net

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.643>

Recibido: 28/10/2022 | Correcciones recibidas: 09/04/2023 | Aceptado: 11/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

Esta investigación estudia la capacidad de absorción de agua de los paneles de hormigón y su proceso de autorreparación, mediante la incorporación de aditivo al hormigón o aplicación sobre la superficie. La Caracterización fue realizada por medio de ensayos de permeabilidad, absorción de agua por inmersión y capilaridad; después del curado en húmedo, los paneles con aditivo cristalizador aplicado superficialmente mostraron menor capacidad de absorción, seguidos de los sin aditivo y los con aditivo incorporado, que mostraron mayor absorción. A través de microscopía, se pudo observar que la cristalización de los paneles con aditivo superficial fue más avanzada en comparación con aquellos con aditivo incorporado. Las grietas inducidas no alcanzaron el llenado completo de los poros después del curado, en ambos tipos de aplicación.

Palabra clave: aditivo cristalizante; fisura; autorreparación; impermeabilización; hormigón.

Citar como: Alves, F. E. Z., Gurkewicz, R. P., Zancan, E. C., Nieves, L. J. J., Antunes, E. G. P. (2023), "Estudio de paneles de hormigón impermeabilizado con aditivo reductor de permeabilidad a base de silicatos", Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 175 – 191, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.643>

¹ Departamento de Engenharia Civil, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

² GPDECC, Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor F. E. Z. Alves contribuyó con la actividad de conceptualización en un 80%, experimentación en un 75%, análisis de datos en un 75% y redacción en un 70%, el autor R. D. P. Gurkewicz contribuyó con la actividad de conceptualización en un 20%, redacción en un 30%, revisión en 33% y traducción en 50%, el autor E. C. Zancan contribuyó con actividad de experimentación en 25%, análisis de datos en 25% y supervisión en 50%, autor L. J. J. Nieves contribuyó con actividad de revisión en 33% y traducción en 50%, la autora E. G. P. Antunes contribuyó con la actividad de revisión en un 34% y la supervisión en un 50%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Study of waterproofed concrete panels with silicate-based permeability reducing admixtures

ABSTRACT

This research studies the water absorption capacity of concrete panels and its self-healing process, using the incorporation of admixtures to the concrete or its application on the surface. Through permeability tests, water absorption by immersion and by capillarity, after the wet curing, the panels with crystalline admixtures applied superficially showed lower absorption capacity, followed by those without admixtures and those with the admixtures incorporated into the concrete, which showed greater absorption. Microscopy characterization was performed on the panels split in half, it was observed that the crystallization of the panels with superficial admixtures was more advanced compared to those with the incorporated admixtures. The induced fissures did not reach full pore filling after curing in both types of application.

Keywords: crystalline admixtures; fissure; self-healing; waterproofing; concrete.

Estudo de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato

RESUMO

Esta pesquisa estuda a capacidade de absorção de água em painéis de concreto e seu processo de autocicatrização, através da incorporação de aditivo ao concreto ou aplicação na superfície. Através de ensaios de permeabilidade, absorção de água por imersão e por capilaridade, após a cura úmida dos painéis, os painéis com aditivo cristalizante aplicado superficialmente apresentaram menor capacidade de absorção, seguido pelos sem aditivo e as com o aditivo incorporado ao concreto. Através da microscopia realizada nos painéis partidos ao meio, pôde-se observar que a cristalização dos painéis com aditivo superficial estavam mais avançadas em comparação aos com o aditivo incorporado. As fissuras induzidas não atingiram o total preenchimento de poros após a cura, em ambos os tipos de aplicação.

Palavras-chave: aditivo cristalizante; fissura; auto cicatrização; impermeabilização; concreto.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, con la disminución de la demanda y el aumento de la competitividad en el mercado de la construcción civil, las empresas han comenzado a prestar más atención a los materiales que utilizan en sus edificaciones, con el fin de minimizar costos, reparar y, de esta forma, seguir siendo competitivas en el mercado. Además de los factores económicos, la norma de desempeño, como es conocida la NBR 15575:2013, con énfasis en la satisfacción de las necesidades de los usuarios, brinda oportunidades para la búsqueda y utilización de nuevos materiales y métodos constructivos en las edificaciones.

Entre los materiales que se utilizan en una edificación, merecen especial atención los utilizados para la impermeabilización, dado que su costo es del 1% al 3% del valor de la edificación (VEDACIT, 2019).

Actualmente, los productos utilizados en el proceso de impermeabilización están divididos en 2 grupos por la NBR 9574:2008, materiales rígidos y flexibles. De esta forma, deberán ser aplicados en lugares acordes a sus características técnicas para garantizar la eficiencia del sistema. Dentro del grupo rígido se encuentran los aditivos cristalizantes. Compuesto por silicatos, que al mezclarse con agua y en contacto con la alcalinidad del hormigón, se convierten en hidrosilicatos, un cristal insoluble. Los cristales tienen la capacidad de rellenar los poros y las grietas del hormigón, haciéndolo impermeable.

La capacidad de relleno de grietas, también llamada autocuración, es una gran ventaja del sistema, especialmente en estructuras que necesitan ser impermeables a presiones negativas, según el proceso descrito por la norma NBR 9574:2008. Gracias a la capacidad de autorreparación del hormigón, estas grietas, si no superan el límite de 0,6 mm de apertura, pueden rellenarse automáticamente.

Según Takagi, Almeida Júnior y Oliveira (2007), el tratamiento de cristalización es un proceso fisicoquímico donde los principios activos del cristalizador desencadenan reacciones catalíticas, compatibles con las reacciones de hidratación del cemento, en las que ocurre la formación de cristales no solubles y no tóxico en la estructura de hormigón. De esta forma, se asegura que no haya penetración de agua por capilaridad, soportando presiones hidrostáticas tanto positivas como negativas de hasta 0,7 MPa.

Como se añaden al hormigón fresco, después del endurecimiento, los cristalizadores impiden el paso del agua en fase líquida, pero no impiden completamente el paso en fase gaseosa. Este comportamiento puede ser validado por los autores Pazderka y Hájková (2016), quienes luego de pruebas con dos cristalizadores diferentes obtuvieron porcentajes de solo 16% y 20% de reducción en la absorción de vapor de agua.

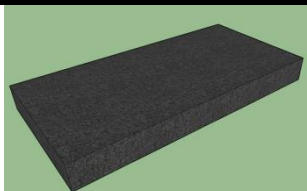
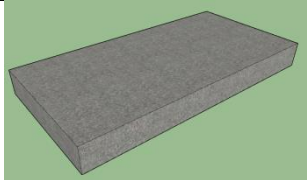
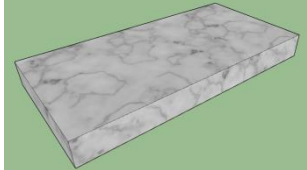
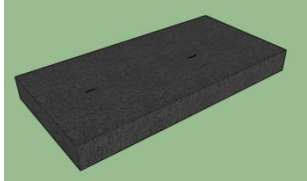
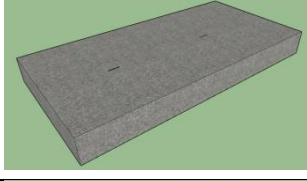
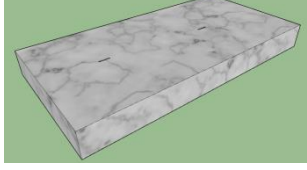
Estudios recientes realizados por Huang et al. (2016) con ayuda de resonancia magnética demostraron que, en hormigones con aditivos reductores de permeabilidad, después de algunas horas, el contenido de agua no ligada químicamente disminuyó en las zonas adyacentes a las grietas, demostrando que se utilizó el agua que había penetrado en la fisura en procesos de reparación hidratación, densificando estas zonas.

Según la empresa que fabrica el producto utilizado en el presente trabajo, el hormigón con aditivos puede rellenar grietas de hasta 0,6 mm, siendo este valor 0,2 mm superior al máximo permitido por la norma NBR 6118:2014, para hormigón armado insertado en la clase de agresividad ambiental I. Esta investigación estudia y evalúa la capacidad de absorción de agua de los paneles de hormigón y su proceso de autorreparación, mediante dos métodos de aplicación de aditivos reductores de permeabilidad.

2. PROCEDIMIENTO

Para comprobar la impermeabilidad y el efecto autorreparador en paneles de hormigón, se elaboró un procedimiento experimental que consiste en la ejecución de 2 grupos de paneles con 3 subgrupos cada uno. La distinción entre el primer y el segundo grupo se refiere a la presencia de grietas inducidas, es decir, un grupo tenía dos grietas inducidas en todo el espesor del panel, mientras que el segundo grupo no las tenía. Los subgrupos se distinguen según el tratamiento impermeabilizante utilizado, no teniendo el primer subgrupo ningún tipo de tratamiento impermeabilizante, mientras que el segundo y tercer subgrupo fueron impermeabilizados, pero de forma diferente entre ellos. El segundo subgrupo se impermeabilizó incorporando el aditivo cristalizante al hormigón, y en el tercer subgrupo se aplicó el aditivo cristalizante en una de las superficies de los paneles. Para ello, se produjeron 18 paneles (9 para cada grupo, 3 para cada subgrupo). La Tabla 1 presenta los grupos y subgrupos desarrollados, además de la nomenclatura adoptada para cada subgrupo de paneles.

Tabla 1. Plantillas de panel.

GRUPO	SUBGRUPO		NOMENCLATURA
SIN GRIETAS		Panel de control sin aditivo cristalizante	S CRI
		Panel Con Aditivo Cristalizante Mezclado Con Hormigón Aún Fresco	C CRI
		Panel con aditivo de cristalización aplicado superficialmente después del tiempo de curado	C CRI SOB
CON GRIETAS		Panel de control sin aditivo cristalizante	S CRI+F
		Panel Con Aditivo Cristalizante Mezclado Con Hormigón Aún Fresco	C CRI+F
		Panel con aditivo de cristalización aplicado superficialmente después del tiempo de curado	C CRI SOB+F

Los paneles producidos miden 50 x 25 x 5 cm (largo x ancho x espesor) y para su ejecución se utilizaron moldes de madera de 2 cm de espesor. El hormigón utilizado fue dosificado en planta maquinada con resistencia media de 10 MPa, con revenimiento de 10 ± 2 cm, conforme NBR 16889:2020. El llenado de los moldes se realizó de forma manual.

La aplicación del aditivo cristalizador sobre los paneles de los subgrupos “C CRI SOB” y “C CRI SOB+F” se produjo después de 28 días de curado de los paneles. La figura 1(a) ilustra la mezcla de hormigón en los moldes y la figura 1(b) el molde lleno de hormigón.

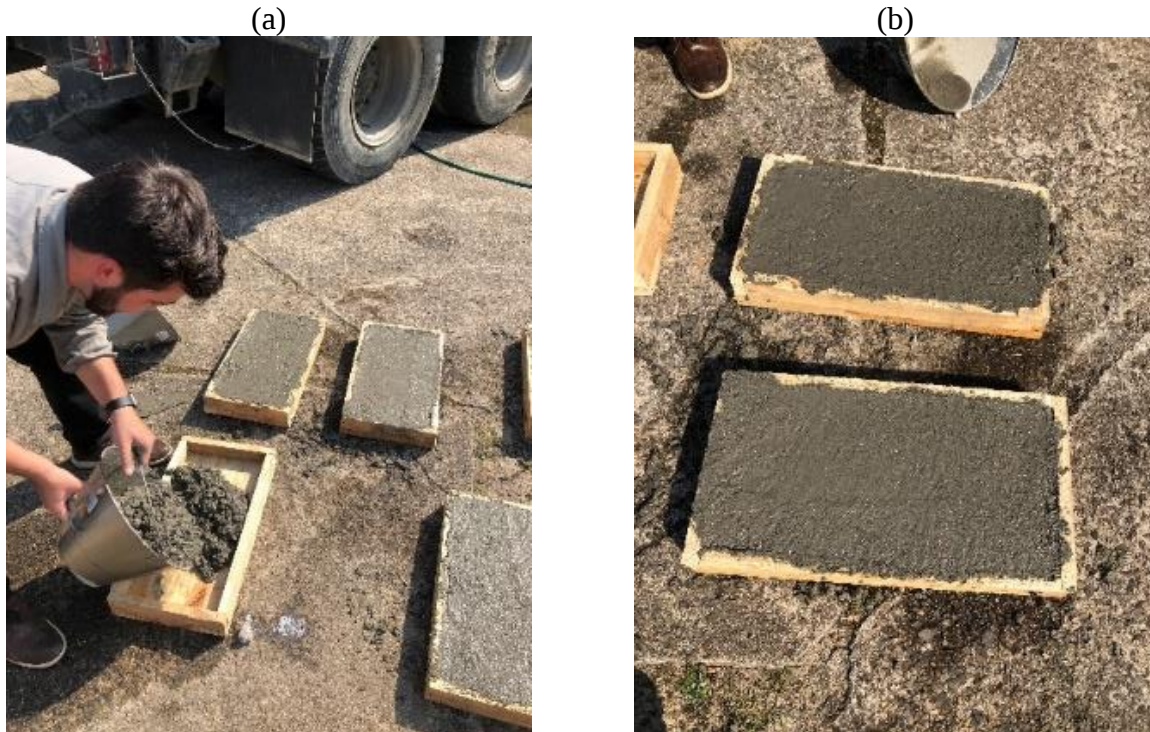


Figura 1. Moldes: (a) hormigonado de un panel, (b) molde lleno de concreto.

Se indujeron grietas en los paneles mediante la inserción de dos láminas de aluminio de 0,4 mm de espesor que se introdujeron en cada panel al poco tiempo de hormigonado y se retiraron a las 48 horas de hormigonado, cuando su fluidez no era capaz de provocar el cierre de la grieta. El espesor de la lámina fue determinado siguiendo la NBR 6118:2014, que limita el valor de 0,4 mm como la mayor dimensión permisible de fisuración en elementos estructurales de hormigón armado y la recomendación del fabricante sobre la máxima dimensión de relleno del producto.

La figura 2(a) muestra las láminas de aluminio insertadas en un panel y la figura 2(b) la grieta inducida a través de la lámina de aluminio, ambas 48 horas después del hormigonado, es decir, cuando ya era posible retirar las láminas de los paneles de hormigón.

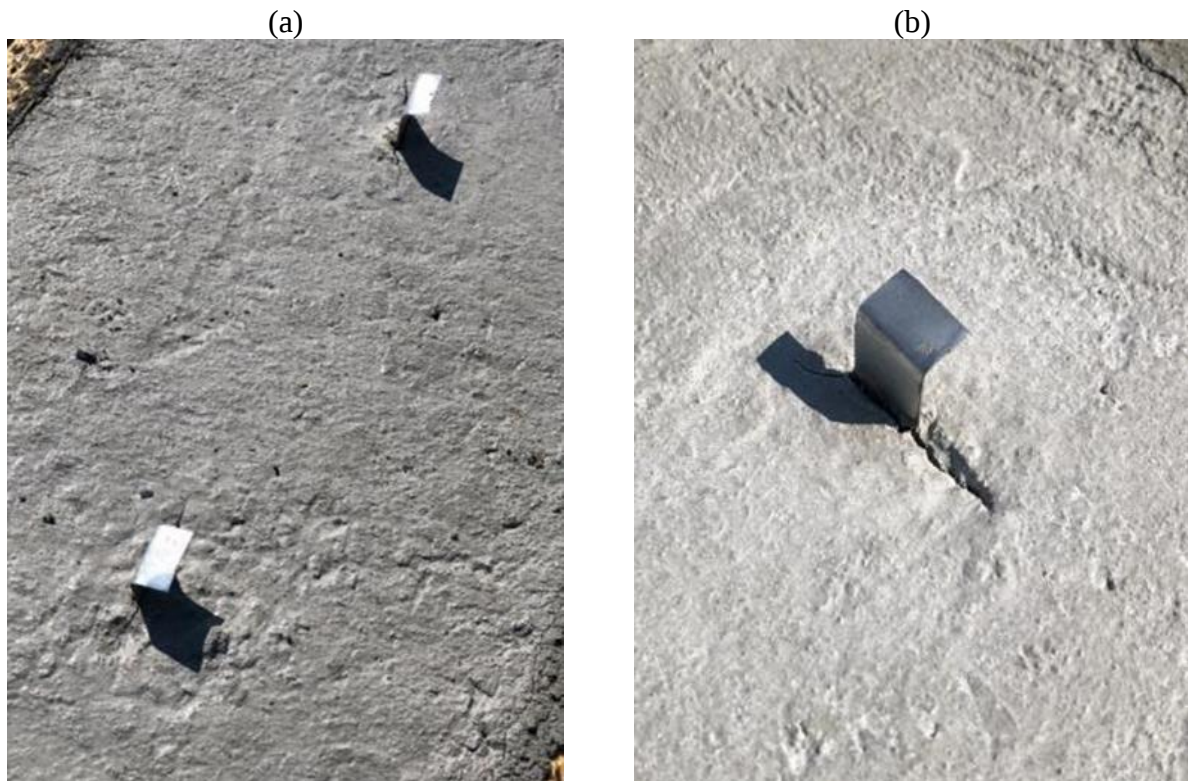


Figura 2. Láminas de inducción de grietas: (a) panel con dos láminas, (b) lámina en detalle.

En la Tabla 2 se presentan las características del aditivo cristalizador utilizado en la investigación.

Tabela 2. Características do aditivo

Densidad	1.200 Kg/m ³
Base	Silicatos
Dosificación	200 ml por cada 50 kg de cemento o 1,2 l por cada m ³ de hormigón
Aspecto	Líquido amarillento
pH	11
Viscosidad (Ford 4 a 25°C)	12 segundos
Validez	24 meses a partir de la fecha de fabricación

Para mezclar el aditivo al hormigón se utilizó una hormigonera. Cabe señalar que tal acción fue necesaria para no contaminar el hormigón de los paneles sin el uso del aditivo. En la figura 3(a) se muestra la cantidad de producto utilizado para el hormigonado y en la figura 3(b) el proceso de incorporación del aditivo al hormigón.

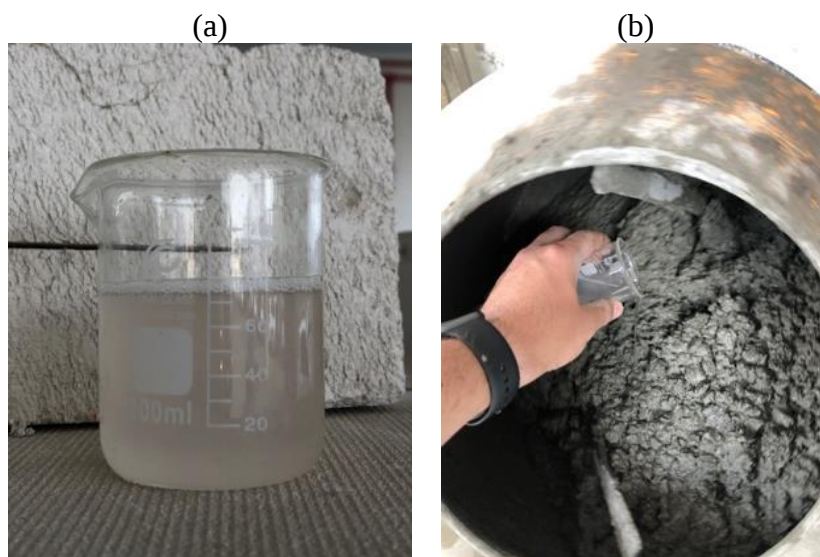


Figura 3. Proceso de mezclado del cristizador: (a) cantidad requerida de cristizador, (b) proceso de mezclado en la hormigonera

Después de la ejecución y desencofrado de los paneles, que se produjo al tercer día, los paneles fueron sometidos a un curado sumergido durante un período de 28 días. Para evitar la contaminación de muestras aún no impermeabilizadas, los paneles con impermeabilizante incorporado al hormigón se separaron en diferentes tanques. Después de 28 días de curado, los paneles se secaron en estufa durante 72 horas a una temperatura de 40 ± 5 °C. La Figura 4(a) muestra los paneles durante el curado sumergido y la Figura 4(b) los paneles después del proceso de curado y secado.

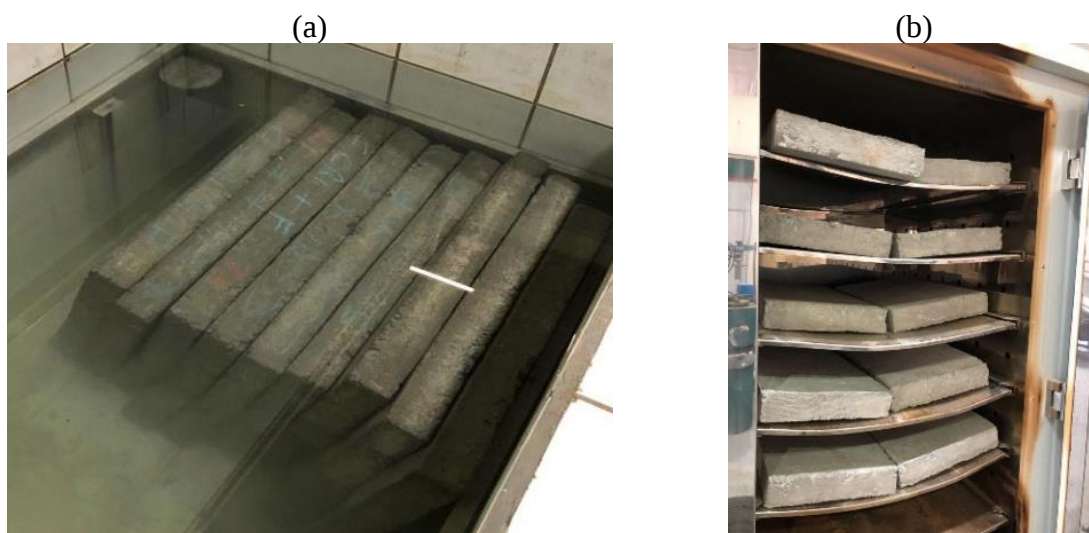


Figura 4. Paneles durante el curado y secado sumergido: (a) paneles en tanque, (b) paneles en estufa.

Después del secado de los paneles, se aplicó el aditivo cristalizante a los paneles de los subgrupos “C CRI SOB” y “C CRI SOB+F”. La aplicación se realizó a través de 2 manos del producto con la ayuda de un pincel. La superficie de estos paneles estaba completamente saturada con el aditivo de cristalización y se necesitaron aproximadamente 3 horas para que los paneles absorbieran completamente el aditivo. Posteriormente, estos paneles se almacenaron al aire libre durante 3 días, y durante estos días se expusieron a la lluvia, lo que ayuda a la hidratación del aditivo cristizador.

La Figura 5(a) muestra la aplicación superficial del aditivo en un lado de las placas, la Figura 5(b) las placas durante el proceso de absorción del producto y la Figura 5(c) el proceso de curado de los paneles con aplicación superficial.

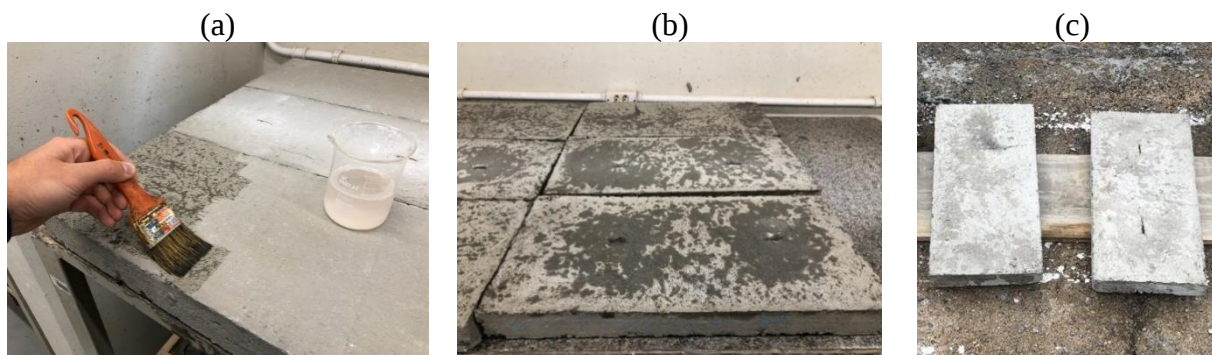


Figura 5. Proceso de aplicación del cristalizador: (a) aplicación con pincel, (b) paneles impermeabilizados, (c) paneles durante el proceso de curado.

Los paneles “C CRI SOB” y “C CRI SOB+F” recibieron un total de 14,4 mm de lluvia, como se muestra en la Figura 6, extraída de la estación meteorológica cercana al lugar de la prueba.

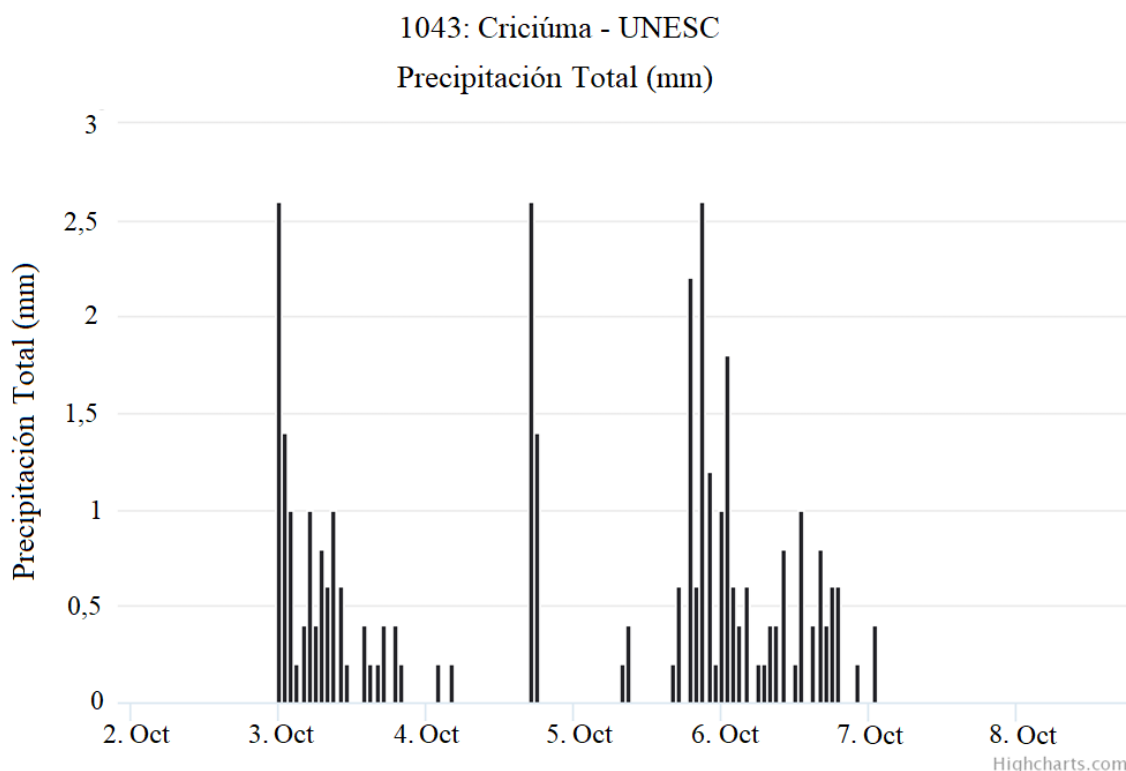


Figura 6. Gráfico índice de precipitaciones (Fuente: EPAGRI).

Una vez finalizada la etapa de ejecución, impermeabilización y curado de los paneles, se iniciaron las pruebas para verificar la permeabilidad de los paneles. Los ensayos realizados fueron: determinación de absorción de agua por inmersión, absorción de agua por capilaridad con cálculo del índice de vacíos y absorción de agua por el tubo de Karsten.

La primera prueba realizada fue la prueba para determinar la permeabilidad utilizando el tubo de Karsten. Este ensayo fue realizado de acuerdo con la NBR 14992:2003, que especifica tal verificación para morteros a base de cemento Portland para el rejunte de baldosas cerámicas. Sobre

los paneles de hormigón se colocaron los tubos de Karsten y se sellaron con poliuretano sus bases laterales, que estaban en contacto con la superficie de los paneles. Cada tubo se fijó a 10 cm de distancia de los bordes ya 30 cm de distancia entre los tubos, por lo que había dos tubos por panel. Los tubos de Karsten se llenaron de agua hasta el volumen predefinido de 3,5 ml y posteriormente se realizaron las mediciones de nivel a los 60, 120, 180 y 240 minutos. Cada panel tenía dos puntos de medición de la permeabilidad.

En la figura 7(a) se muestra el ensayo que se está realizando en el panel con cristalizador y en la figura 7(b) el tubo de Karsten sobre la grieta de una placa con cristalizador aplicado sobre el hormigón.

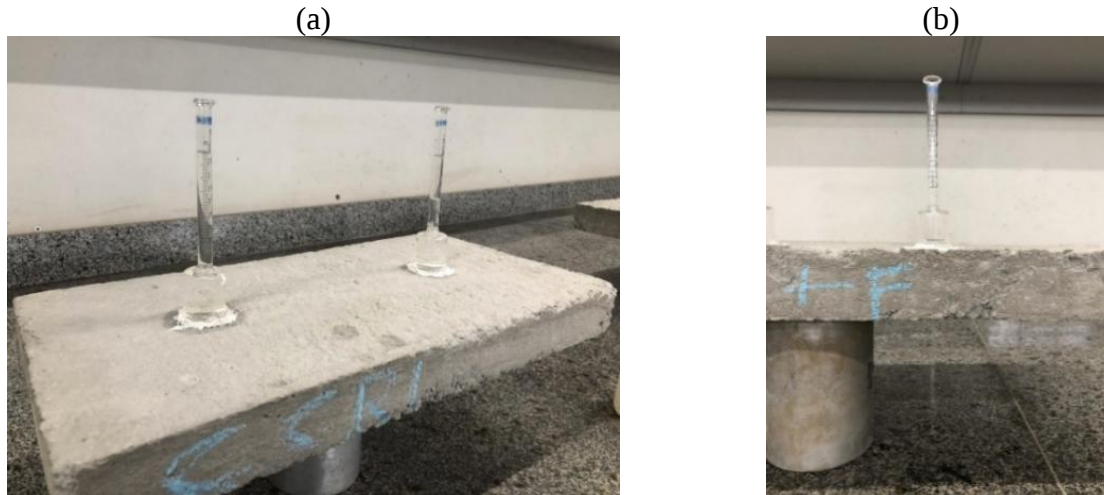


Figura 7. Tubos de Karsten fijado en los paneles: (a) Tubo en panel sin grieta, (b) Tubo en panel con grieta.

El segundo ensayo realizado se refiere a la determinación de la absorción de agua del panel y al cálculo del índice de vacíos, conforme descrito en la NBR 9778:2005, utilizando tres paneles por condición. Los paneles se secaron inicialmente en estufa a 105 ± 5 °C por 72 horas y se midió la masa seca, luego se sumergieron en agua por otras 72 horas, hasta su completa saturación. Después de retirar los paneles saturados, se pesó la muestra saturada y se realizó un nuevo pesaje utilizando una balanza hidrostática, como se muestra en la Figura 8. A partir de estos valores, fue posible determinar la absorción de agua, el índice de vacío, la masa específica seca y la masa específica saturada.



Figura 8. Pesaje hidrostático.

El porcentaje de absorción se puede calcular con la Ecuación 1.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que

A es el contenido de absorción, expresado en porcentaje;

m_{sat} es la masa de la muestra saturada en agua después de la inmersión y ebullición;

m_s es la masa de la muestra secada en estufa.

El último ensayo realizado fue la determinación de la absorción de agua por capilaridad, descrita por la norma NBR 9779:1995. Para llevar a cabo esta prueba, los paneles se colocaron en una profundidad de agua de 0,5 cm durante un período de 72 horas, con el fin de verificar la absorción de agua por capilaridad. Para poder observar las variaciones de absorción entre los paneles, se sumergieron las superficies impermeabilizadas. Se tomaron medidas de masa después de 3, 6, 24, 48 y 72 horas.

La Figura 9(a) muestra la verificación de la profundidad del agua de 0,5 cm, la Figura 9(b) los paneles dispuestos en el tanque durante el proceso de absorción y la Figura 9(c) el pesaje de uno de los paneles.

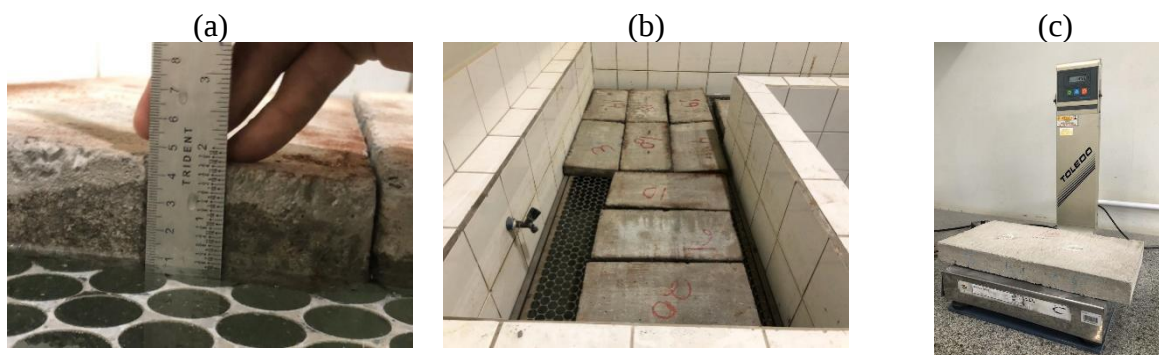


Figura 9. Ensayo de absorción de agua por capilaridad: (a) Panel sumergido de 0,5 cm de profundidad, (b) Paneles en el tanque, (c) Panel siendo medido para determinar la masa.

La absorción de agua por capilaridad se puede calcular con la Ecuación 2.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (2)$$

Onde

C es la absorción de agua por capilaridad, expresada en gramos por centímetro cuadrado;

m_{sat} es la masa saturada de la muestra que permanece con un lado en contacto con el agua durante un período determinado, expresada en gramos;

m_s es la masa de la muestra seca, tan pronto como alcanza una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, expresada en gramos.

S es el área de la sección transversal, expresada en centímetros cuadrados.

Los datos de los resultados se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey, cuando fue necesario, con una significancia del 95%.

Una vez finalizadas las pruebas se realizó una microscopía de las placas para una mejor observación del estado de cristalización de los poros. Para ello se rompieron 3 placas a saber “S CRI”, “COM CRI” y “C CRI SOB”, y un microscopio digital con capacidad de aumento de 1600x.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la prueba de permeabilidad con Tubo de Karsten, representados por la Figura 10, indican los valores de permeabilidad obtenidos a lo largo del tiempo (60, 120, 180 y 240 min). Como se puede observar, los paneles con mayor permeabilidad, a los 240 minutos, tiempo final de medición, fueron los paneles con aditivo cristalizador incorporado al hormigón, seguidos de los paneles sin cristalizador y, por último, el panel con cristalizador aplicado en su superficie.

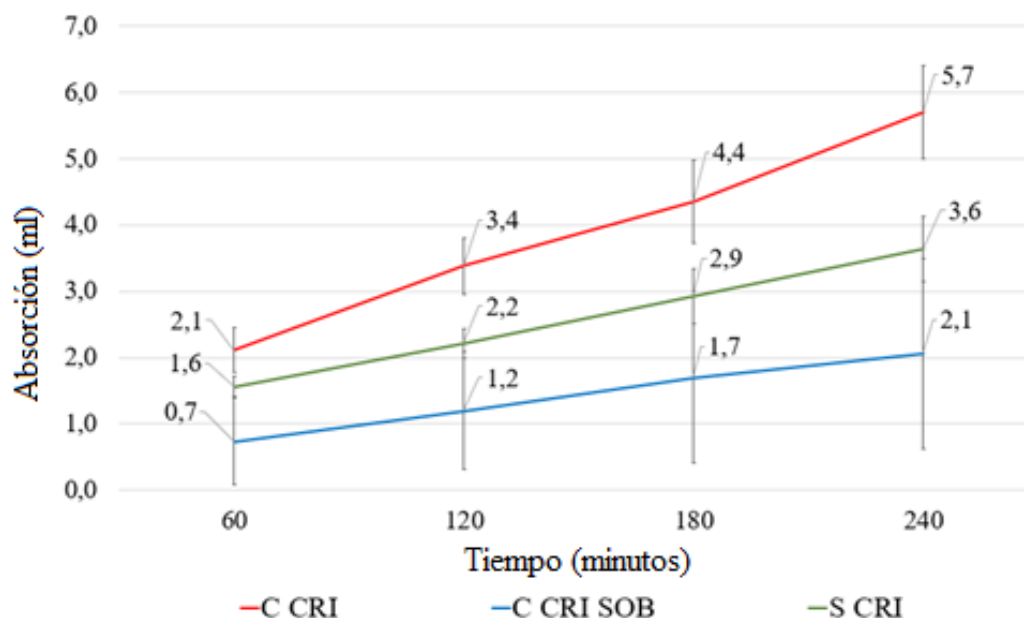


Figura 10. Absorción media a lo largo del tiempo.

Mediante el análisis de los valores de permeabilidad presentados gráficamente, se observó que tanto la absorción inicial como la velocidad de absorción de los paneles con la incorporación del aditivo cristalizador fueron superiores a las de los demás paneles. La mayor permeabilidad, desde la primera medición, de los paneles “C CRI” con relación a los demás paneles alcanzó un 171,43% más de absorción en comparación con el “C CRI SOB” y un 58,33% más con relación al panel “S CRI”.

La mayor velocidad de absorción de agua de los paneles “C CRI” se puede visualizar por su mayor inclinación con relación a los demás paneles, así como por la mayor diferencia entre la absorción inicial y final, que fue de 171.34%, siendo que, para los paneles “C CRI SOB” fue del 200% y para los paneles “S CRI” fue del 125%.

Luego del análisis estadístico, mediante análisis de varianza (ANOVA), se pudo concluir que los paneles presentan diferencia significativa entre ellos en la prueba de permeabilidad a través del tubo de Karsten, es decir, el tipo de tratamiento impermeabilizante influyó en los resultados de esta verificación. A través del Test de Tukey ($p = 4.13477E-05$) se puede afirmar que los paneles “C CRI” fueron los más permeables, seguidos de los paneles “S CRI” y, finalmente, del panel “C CRI SOB”.

Es importante mencionar que no fue posible analizar la permeabilidad, por el método del tubo de Karsten, de los paneles “C CRI+F”, “S CRI+F” y “C CRI SOB+F”, con grietas inducidas, debido a la dimensión final de la apertura de la grieta, con aproximadamente 1,3 mm. Aun así, cabe señalar que se intentó realizar la prueba, sin embargo, dado el grosor de la abertura, el agua del tubo de Karsten, que se insertó exactamente sobre la grieta, drenó completamente por la grieta en segundos.

La Figura 11(a) muestra la lámina después de 48 horas de hormigonado de los paneles y la Figura 11(b) la grieta después del proceso de curado de los paneles.



Figura 11. Grietas: (a) Grieta aún con la lámina, (b) Grieta después de quitar la lámina

La grieta inducida, que había sido planificada para 0,4 mm, superó su apertura en 0,9 mm, pues finalizó en 1,3 mm (Figura 11), extrapolando los 0,6 mm presentados por la empresa como dimensión máxima para rellenar las grietas.

Durante el proceso de endurecimiento del hormigón ocurren reacciones que originan su retracción plástica. Según Marin, Brasil (2016), la retracción plástica ocurre debido a la evaporación del agua en la superficie del hormigón recién compactado y está influenciada por las condiciones climáticas a las que está expuesto el hormigón. Por lo tanto, no fue posible evaluar el relleno de las grietas inducidas a través de la prueba de permeabilidad con el método del tubo de Karsten, considerando que las grietas inducidas tenían un espesor de apertura final de aproximadamente 1,3 mm. Además, el proceso de llenado por efecto “autocurativo” es lento, ya que, como lo presenta Venquiaruto (2017), luego de 91 días de curado en húmedo, hubo una recuperación parcial de las microfisuras, con relación a los análisis luego de 3 y 28 días. Después de 3 días de cura, las grietas oscilaron entre 2294 μm y 5410 μm , ya los 91 días tenían dimensiones de 1204 μm a 3077 μm .

A través de los resultados del ensayo de absorción de agua por inmersión, presentados a partir de las Figuras 12 y 13, se pudo concluir que nuevamente los paneles con cristalizador incorporado al concreto fresco presentaron mayor índice de vacíos y, en consecuencia, mayor absorción luego de 72 horas sumergidos. Los paneles con cristalizador aplicado superficialmente tuvieron el índice de vacíos más bajo y un promedio de 1,29 % más bajo que los paneles con cristalizador mezclado con hormigón.

Los resultados se condensaron en “C CRI y C CRI+F” (con cristalizador y con cristalizador + grieta inducida), “C CRI SOB y C CRI SOB+F” (con cristalizador en superficie y con cristalizador en superficie + grieta inducida), “S CRI y S CRI + F” (sin cristalizador y sin cristalizador + grieta inducida).

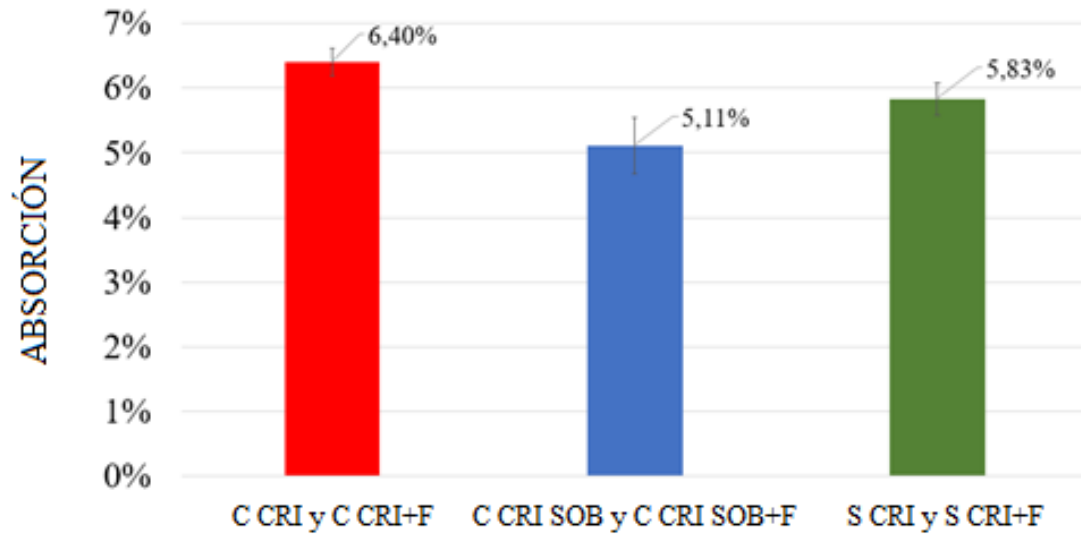


Figura 12. Absorción después de 72 horas.

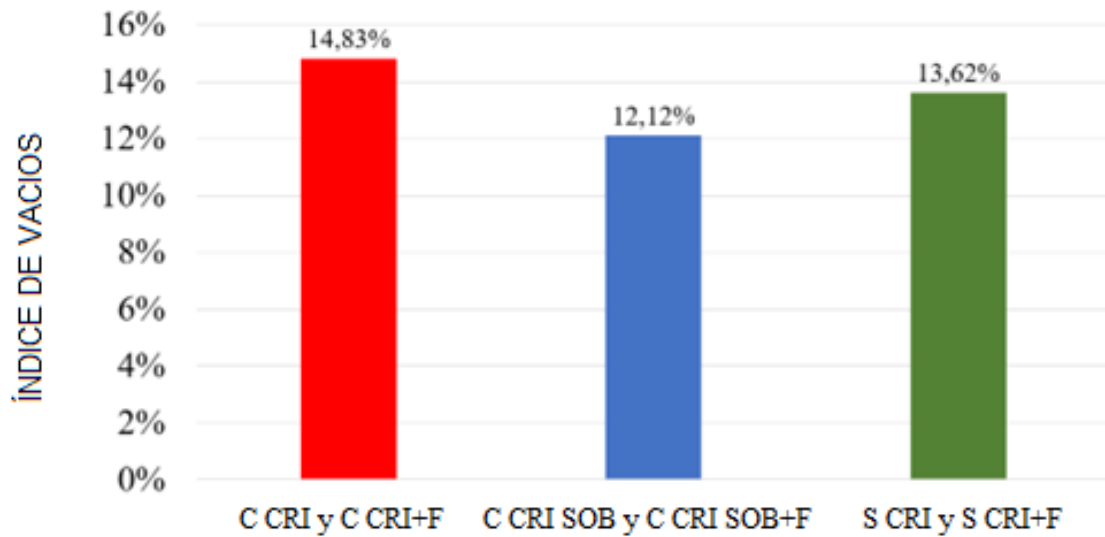


Figura 13. Índice de vacíos.

Los resultados del ensayo de absorción de agua capilar se pueden ver en la Figura 14. Nuevamente se encontró que los paneles “C CRI” y “C CRI+F” presentaron valores que demostraron mayor permeabilidad de estos paneles con relación a los demás.

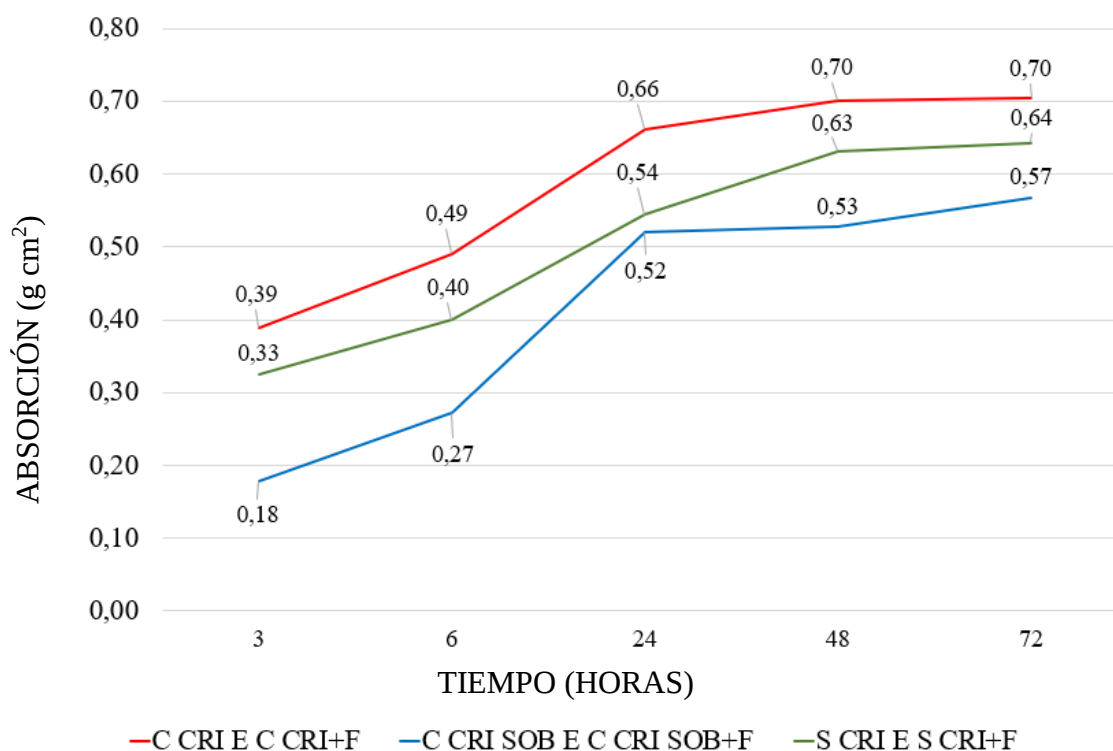


Figura 14. Absorción por capilaridad.

En esta prueba, los paneles “C CRI” y “C CRI+F” tuvieron una absorción de 9,38% superior a los paneles de referencia, mientras que los paneles “C CRI SOB” y “C CRI SOB+F” mostraron una disminución de 10,94%. También es posible observar que durante los periodos de 3 y 24 horas hubo la mayor absorción por parte de los paneles, después de estos periodos las placas tuvieron bajas absorciones.

Después del análisis estadístico mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey, con una significancia del 95% ($p=0,000142449$), fue posible concluir que los paneles presentan una diferencia significativa en sus resultados de absorción capilar en 72 horas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tres ensayos (tubo de Karsten, absorción por inmersión y absorción por capilaridad) se puede concluir que la incorporación del aditivo reductor de permeabilidad provocó un incremento significativo de la permeabilidad y absorción de agua en relación a otro tipo de tratamientos. Por su parte, los paneles tipo “C CRI SOB” y “C CRI SOB+F” tuvieron una disminución significativa en su permeabilidad en comparación con los paneles no tratados (“S CRI” y “S CRI+F”). Este comportamiento puede ser explicado por el proceso de cristalización del aditivo reductor de permeabilidad. Para que se produzca la reacción del aditivo de silicato, es necesario hidratarlo, de forma similar a las reacciones de hidratación de los granos de cemento. Por tanto, el agua inicialmente puesta a disposición en la mezcla acaba siendo necesaria para ambos activos en los primeros días, provocando una formación más lenta de los cristales de hormigón y de los cristales que rellenan los poros.

La presencia del aditivo mezclado con el hormigón durante el proceso de curado puede provocar reacciones internas que dividan el poder de cristalización, ya que ambos utilizan agua para el proceso. Así, la cristalización del producto junto con la del hidróxido de calcio puede ser la responsable de la mayor absorción inicial. La lenta formación de cristales, cuando el aditivo se incorpora al hormigón, se debe a la formación gradual de cristales en el cemento, creada durante el proceso de curado, ya que el producto reacciona tanto con el cemento como con el agua para su

cristalización. De esta forma, los cristales del aditivo y el hormigón empiezan a hidratarse más lentamente que con los paneles sin cristalizador.

Este comportamiento también fue observado por Araújo, Saviatto (2018), quienes, después de un ensayo de absorción y compresión, observaron un aumento de la permeabilidad y una disminución de la resistencia en las placas con el aditivo mezclado con el hormigón, después de 28 días de curado sumergido.

La aplicación superficial sobre los paneles después del proceso de cura presenta un mejor desempeño inicial debido a la mayor concentración superficial del producto y a que los cristales de hidróxido de calcio en el concreto están mayormente hidratados al momento de la aplicación del aditivo reductor de permeabilidad.

Para una mejor visualización de los procesos cristalinos en los 3 tipos de paneles se realizaron microscopías con un microscopio digital que tiene una capacidad de aumento de 1600x. Estas imágenes se muestran en la Figura 15(a) que ilustra el panel después del proceso de corte, la Figura 15(b) microscopía del panel “C CRI”, la Figura 15(c) panel “C CRI SOB” y la Figura 15(d) panel “S CRI”. El corte del panel fue realizado con sierra de diamante y refrigeración por agua en el sitio de corte, minimizando las vibraciones, de acuerdo con la NBR 7680: 2015.

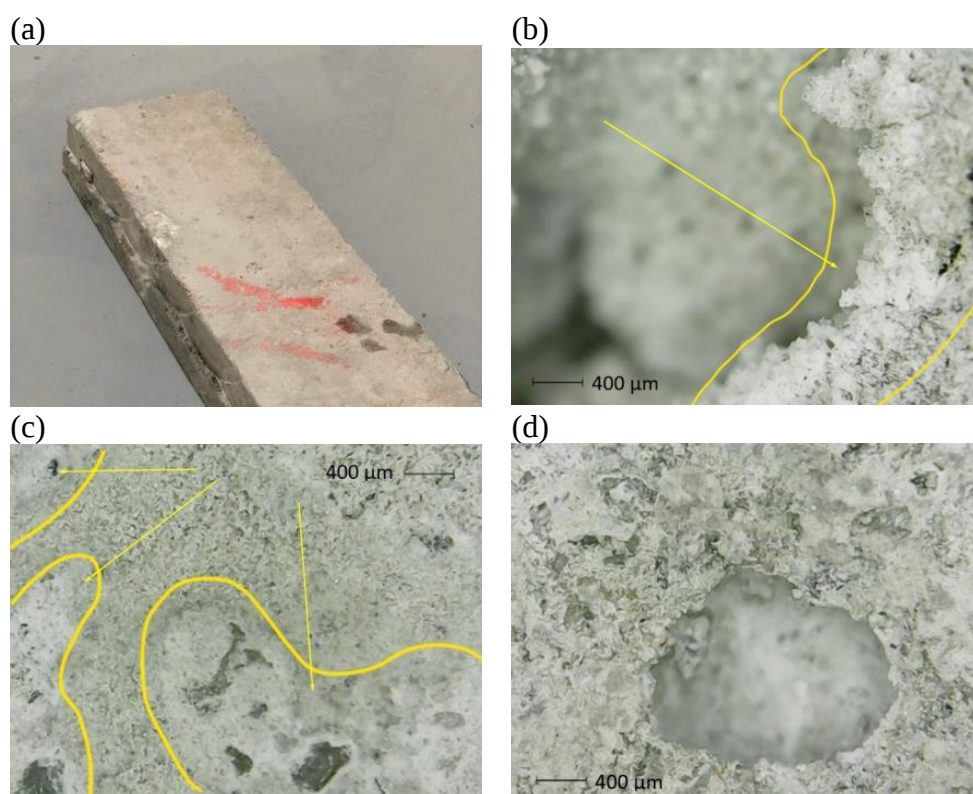


Figura 15. Microscopía: (a) Panel cortado por la mitad, (b) Panel con cristalizador mezclado con hormigón, (c) Panel con cristalizador aplicado encima, (d) Panel de referencia.

En los paneles con la aplicación del aditivo incorporado al concreto (C CRI), fue posible observar pocos cristales en la superficie de los poros, lo que puede indicar un proceso de cristalización iniciándose. En los paneles con aplicación superficial del cristalizador (C CRI SOB), se pudo observar un mayor relleno, siendo muchos completamente obstruidos por los cristales.

4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los resultados se puede retratar una similitud en los datos obtenidos de los ensayos, los cuales presentan el mismo comportamiento en cuanto a la capacidad de absorción y permeabilidad de los paneles. Señalando las muestras con el aditivo cristalizador aplicado superficialmente, con menor permeabilidad al agua, y las muestras con el aditivo mezclado con el hormigón, con los valores más altos de vacíos y absorción de agua.

El desempeño superior de los paneles con aplicación superficial se explica por la alta concentración del aditivo en la superficie, obteniendo una mayor capacidad de cristalización ya que los cristales provenientes de la cura del concreto están completamente hidratados, de esta forma el aditivo logra tener una acción inicial más efectiva.

Los paneles con aditivo mezclado con concreto mostraron una mayor absorción en todas las pruebas y un mayor índice de vacíos después del tiempo sumergido. Esto sucede porque su proceso de cristalización no ha terminado, ya que utiliza agua y cristales de hidratación del cemento, que se están formando simultáneamente con los cristales de aditivo, lo que hace que el proceso sea más lento, y no es posible observar mejoras después de 28 días de cura sumergida.

A pesar de no haber presentado relleno de la fisura después del tiempo de cura, el proceso de cristalización sí estuvo presente en las fisuras, requiriendo más tiempo en contacto para que eventualmente el relleno pudiera terminar.

Para trabajos futuros, se recomienda utilizar hormigón más resistente, con al menos 20 Mpa. Realizar las mismas pruebas, pero verificando los resultados después de 1, 20, 40, 60 y 90 días después del proceso de curado sumergido, para verificar la evolución del proceso y monitorear la obstrucción de los poros a lo largo del tiempo.

5. REFERENCIAS

- Araújo, M. D., Saviatoo, M. S. C. (2018), *Estudo da influência de aditivo impermeabilizante em concreto*. 83 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4666>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.992: Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.575: Edificações habitacionais- Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9574: Execução de impermeabilização*. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7610: Concreto — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2015.

- Huang, H., Ye, G., Pel, L. (2016), *New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests*. Materials and Structures 49, no. 7, p. 2509-2524. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0664-9>
- Marin, J. S., Brasil, K. F. (2016), *Controle da retração plástica em lajes de cobertura de concreto armado*. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14309>
- Neville, A. M. (2016), *Propriedades do concreto*. 5 ed. Porto Alegre: Bookman.
- Pazderka, J., Hajková, E. (2016), *Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete*. Journal of Advanced Engineering. Praga, República Checa. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>
- Takagi, E. M., Almeida, W. J., Oliveira, F. S. (2007), *Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estrutura de concreto armado*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, Florianópolis.
- VEDACIT (2013), *Manual técnico de impermeabilização de estruturas*. 7ª edição. Disponível em: <https://www.vedanews.com.br/uploads/biblioteca/manual-tecnico-impermeabilizacao-de-estruturas-7.pdf> (acesso: 11 de julho de 2019).

Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión

A. Luévanos Rojas ^{1*} 

*Autor de Contacto: arnulfol_2007@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.671>

Recibido: 21/02/2023 | Correcciones recibidas: 13/04/2023 | Aceptado: 20/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

Este documento muestra un nuevo modelo para diseño completo de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo funciona parcialmente a compresión. La metodología se presenta por integración para obtener momentos, cortantes por flexión y penetración. Los ejemplos numéricos se presentan para el diseño de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, y se comparan con el modelo actual (área total funciona en compresión) en términos de volúmenes de concreto y acero. El modelo actual muestra mayores volúmenes de concreto y acero. Por lo tanto, el nuevo modelo es el más adecuado, ya que presenta mejor control de calidad en los recursos utilizados.

Palabras clave: zapatas aisladas rectangulares; nuevo modelo para diseño completo; momentos; cortante por flexión; cortante por penetración.

Citar como: Luévanos Rojas, A. (2023), “Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 192 – 219, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.671>

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

Contribución de cada autor

En este trabajo solo se tuvo un autor.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

New model for complete design of rectangular isolated footings taking into account that the contact surface works partially in compression

ABSTRACT

This paper shows a new model for complete design of rectangular isolated footings under uniaxial and biaxial bending, considering that the footing area in contact with the soil partially works to compression. The methodology is presented by integration to obtain moments, flexural shearing and punching shearing. Numerical examples are presented for design of rectangular isolated footings under uniaxial and biaxial flexion and are compared with the current model (total area works in compression) in terms of concrete and steel volumes. The current model shows greater volumes of concrete and steel. Therefore, the new model is the most appropriate, since it presents better quality control in the resources used.

Keywords: rectangular isolated footings; new model for complete design; moments; flexural shearing; punching shearing.

Um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares levando em consideração que a superfície de contato funciona parcialmente em compressão

RESUMO

Este artigo mostra um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares sob flexão uniaxial e biaxial, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente à compressão. A metodologia é apresentada por integração para obter momentos, cisalhamento por flexão e punção. Exemplos numéricos são apresentados para o projeto de fundações isoladas retangulares sob flexão uniaxial e biaxial e são comparados ao modelo atual (a área total funciona em compressão) em termos de volumes de concreto e aço. O modelo atual mostra maiores volumes de concreto e aço. Portanto, o novo modelo é o mais apropriado, pois apresenta melhor controle de qualidade nos recursos utilizados.

Palavras-chave: fundações isoladas retangulares; novo modelo para dimensionamento completo; momentos; cisalhamento de flexão; 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

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

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

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

1. INTRODUCCION

El diseño de zapatas poco profundas apoyadas en el suelo depende de las cargas y los momentos proporcionados por las columnas.

La Figura 1 muestra la distribución de la presión del suelo debajo de la zapata rígida que depende del tipo de suelo, y la posición de la fuerza resultante aplicada en el centro de gravedad de la base. La Figura 1(a) presenta una base que descansa sobre suelo arenoso. La Figura 1(b) muestra una base que descansa sobre suelo arcilloso. La Figura 1(c) presenta la distribución uniforme de la presión del suelo utilizada en el diseño de actual.

La capacidad de carga ha sido investigada para las zapatas poco profundas sometidas a la flexión biaxial, que toma en cuenta una distribución lineal de la presión del suelo y esta área de contacto funciona parcialmente en compresión (Irles-Más and Irles-Más, 1992; Özmen, 2011; Rodriguez-Gutierrez and Aristizabal-Ochoa, 2013a, b; Lee et al., 2015; Kaur and Kumar, 2016; Bezmalinovic Colleoni, 2016; Dagdeviren, 2016; Aydogdu, 2016; Girgin, 2017; Turedi et al., 2019; Al-Gahtani and Adekunle, 2019; Galvis and Smith-Pardo, 2020; Rawat et al., 2020; Lezgy-Nazargah et al., 2022; Gör, 2022).

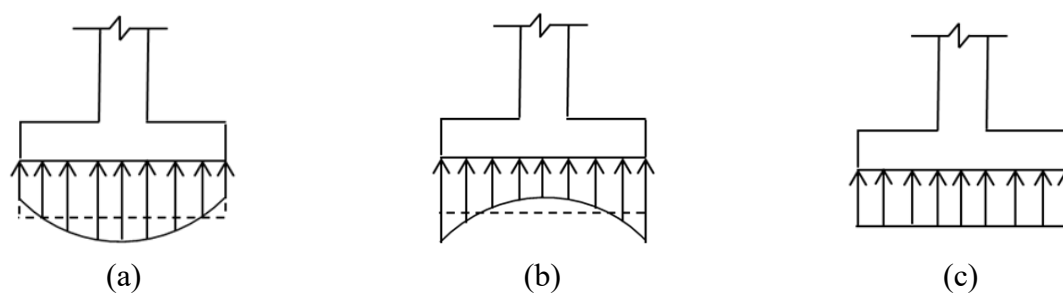


Figura 1. Distribución de la presión debajo de la zapata
Fuente: Elaboración propia

Los modelos matemáticos para el diseño de cimentaciones: para las zapatas aisladas se han desarrollado para formas cuadradas, circulares y rectangulares (Algin, 2000, 2007; Luévanos-Rojas, 2012a, b, 2013, 2014a, 2015a; Luévanos-Rojas et al., 2013, 2014b, 2016b, et al., 2017; Filho et al., 2017; López-Chavarría et al., 2017a, c, 2019; Khajehzadeh et al., 2014); Para zapatas combinadas rectangulares, trapezoidales, de esquina, en forma de T y correa (Jahanandish et al., 2012; Luévanos-Rojas, 2014c, 2015b, c, d, 2016^a, b, et al., 2018a, b, 2020; López-Chavarría et al., 2017b; Velázquez-Santillán et al., 2019; Aguilera-Mancilla et al., 2019; Yáñez-Palafox et al., 2019). Estos trabajos toman en cuenta el área total de contacto que trabaja bajo compresión.

Los modelos más cercanos a este documento son: Soto-García et al. (2022) propusieron un modelo matemático para obtener el área mínima para zapatas aisladas circulares tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión, este modelo presenta un caso porque el análisis se desarrolla para el momento resultante. Vela-Moreno et al. (2022) desarrollaron un modelo matemático para encontrar la superficie mínima para zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión, este modelo muestra cinco casos para flexión biaxial, dos para flexión uniaxial (la carga está en el eje X) y otros dos para flexión uniaxial (la carga está en el eje Y). Kim-Sánchez et al. (2022) presentaron un modelo matemático para obtener el espesor y las áreas de acero transversal y longitudinal para zapatas aisladas circulares tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión.

Esta investigación presenta un nuevo modelo analítico para obtener un diseño completo (espesores y áreas de acero transversal y longitudinal) para zapatas aisladas rectangulares, tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión, este modelo se

basa en el área de contacto con el suelo (lados de la zapata) del modelo propuesto por Vela-Moreno et al. (2022). La formulación del nuevo modelo se desarrolla por integración para encontrar los momentos, los cortantes por flexión y los cortantes por penetración bajo los criterios del código (ACI 318S-19). Otros autores presentan las ecuaciones para encontrar el diseño completo de una zapata aislada rectangular, pero consideran la superficie total trabajando a compresión. Los ejemplos numéricos se muestran para encontrar el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares bajo carga axial y momentos en una y dos direcciones, y se comparan los resultados con los de otros autores para observar las diferencias. Las áreas de contacto con el suelo presentadas en este documento se basan en el trabajo propuesto por Vela-Moreno et al. (2022). Este modelo tendrá su impacto en la industria de la construcción con menores costos (materiales y mano de obra).

2. FORMULACION DEL NUEVO MODELO

Una zapata aislada rectangular rígida se deforma en forma plana, es decir, la distribución de la presión del suelo debajo de la zapata se considera lineal.

La ecuación general para cualquier zapata sujeta a flexión biaxial bajo una carga axial factorizada y dos momentos ortogonales factorizados es:

$$\sigma_u(x, y) = \frac{P_u}{h_x h_y} + \frac{12 M_{ux} y}{h_x h_y^3} + \frac{12 M_{uy} x}{h_x^3 h_y} \quad (1)$$

donde: σ_u es la presión factorizada que genera el suelo debido a la carga axial factorizada y los momentos factorizados que se aplican en la zapata, P_u es la carga axial factorizada, M_{ux} es el momento factorizado en el eje X, M_{uy} es el momento factorizado en el eje Y, h_x y h_y son los lados de la zapata, x y y son las coordenadas donde se ubica la presión generada por el suelo.

La ecuación de flexión biaxial se puede aplicar cuando la fuerza resultante P_u está ubicada dentro del núcleo central (área trabajando completamente en compresión), y cuando la fuerza resultante P_u está fuera del núcleo central (área trabajando parcialmente en compresión) no es válida.

Cuando la fuerza resultante P_u está fuera del núcleo central, las ecuaciones generales de la presión del suelo bajo la zapata sujeta a flexión uniaxial y biaxial son:

Flexión uniaxial (P_u se ubica sobre el eje Y):

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}(2h_{y1} - h_y + 2y)}{2h_{y1}} \quad (2)$$

Flexión uniaxial (P_u se ubica sobre el eje X):

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}(2h_{x1} - h_x + 2x)}{2h_{x1}} \quad (3)$$

Flexión biaxial:

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}[h_{y1}(2x - h_x) + h_{x1}(2y - h_y) + 2h_{x1}h_{y1}]}{2h_{x1}h_{y1}} \quad (4)$$

donde: σ_{umax} es la presión máxima factorizada generada por el suelo debido a la carga axial factorizada y los momentos factorizados que se aplican en la zapata.

Las secciones críticas para los momentos se ubican en los ejes $a-a$ y $b-b$, para las secciones críticas para los cortantes por flexión se ubican en los ejes $c-c$ y $e-e$, y la sección crítica para el cortante por penetración o punzonamiento se presenta en el perímetro formado por los puntos 5, 6, 7 y 8 (ACI 318S-19).

2.1. Zapata aislada rectangular sometida a flexión uniaxial

La Figura 2 muestra los cuatro casos posibles para obtener el área mínima de una zapata aislada rectangular sometida a flexión uniaxial. Dos casos cuando P se ubica en el eje Y : 1) cuando P se ubica dentro del núcleo central; 2) cuando P se encuentra fuera del núcleo central. Dos casos cuando P se ubica en el eje X : 1) cuando P se ubica dentro del núcleo central; 2) cuando P se encuentra fuera del núcleo central.

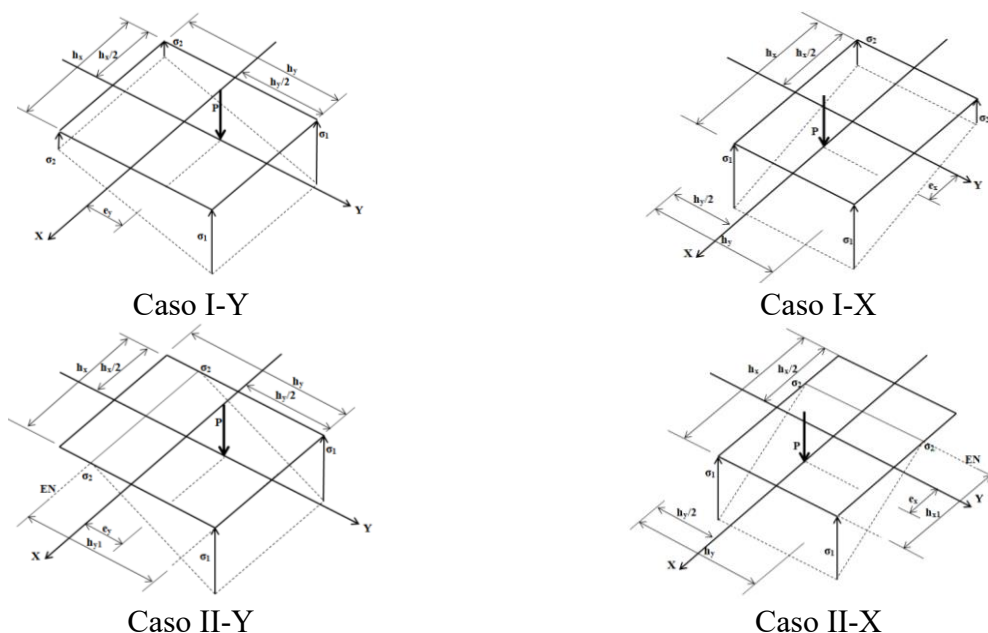


Figura 2. Cuatro casos posibles de area mínima para flexión uniaxial
Fuente: Elaboración propia a partir de Vela-Moreno et al. (2022)

La Figura 3 muestra las secciones críticas para momentos y cortantes de flexión de cuatro casos posibles: Caso I-Y cuando P se ubica en el eje Y , y dentro del núcleo central. Caso II-Y cuando P se ubica en el eje Y , y fuera del núcleo central: Caso II-YA cuando el eje neutro se ubica $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2$ (momento) y $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexión); Caso II-YB cuando el eje neutro se localiza $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2$ (momento) y $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexión). Caso I-X cuando P se localiza en el eje X , y dentro del núcleo central. Caso II-X cuando P se ubica en el eje X , y fuera del núcleo central; Caso II-XA cuando el eje neutro está localizado $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2$ (momento) y $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexión); Caso II-XB cuando el eje neutro está localizado $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2$ (momento) y $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexión).

2.1.1. Cortantes por flexión y momentos

Las ecuaciones generales en los ejes “ c ” y “ e ” para los cortantes por flexión factorizados “ V_{uc} ” y “ V_{ue} ”, y en los ejes “ a ” y “ b ” para los momentos factorizados “ M_{ua} ” y “ M_{ub} ” son:

Caso I-Y

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) dx dy \quad (5)$$

Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión

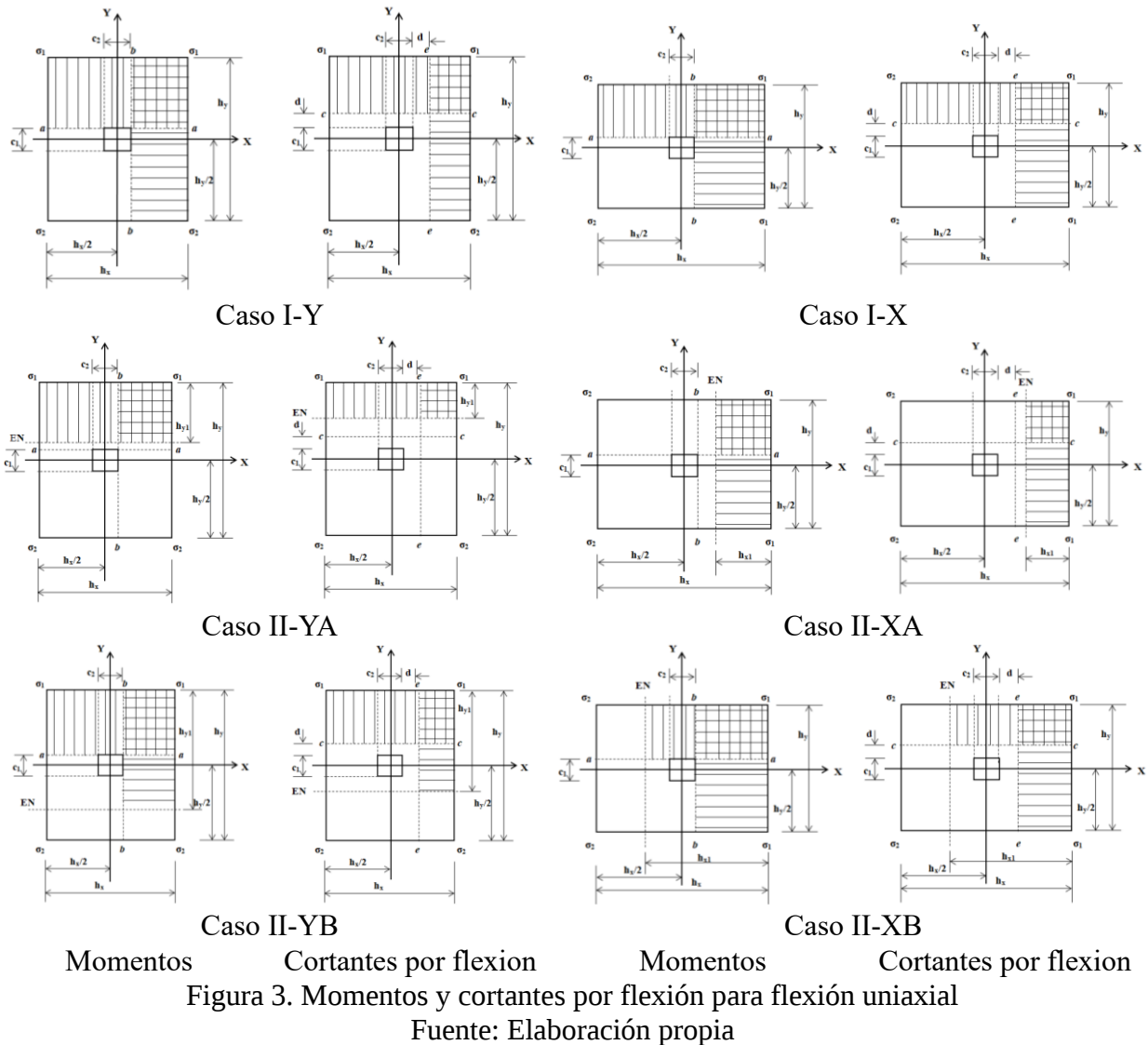
$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) dy dx \quad (6)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (7)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (8)$$

donde: d es la peralte efectivo de la zapata, c_1 y c_2 son los lados de la columna.

Nota: la ecuación (1) se sustituye en las ecuaciones (5) a (8) y $M_{uy} = 0$, y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.



Caso II-YA

Para $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexión) y $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2$ (momento) son:

$$V_{uc} = \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (9)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2} + d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (10)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (11)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (12)$$

Caso II-YB

Para $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexión) y $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2$ (momento) son:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2} + d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (13)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2} + d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (14)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (15)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (16)$$

Nota: la ecuación (2) se sustituye en las ecuaciones (9) a (16) y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.

Caso I-X

Las ecuaciones generales en los ejes “c” y “e” para los cortantes por flexión factorizados “ V_{uc} ” y “ V_{ue} ”, y en los ejes “a” y “b” para los momentos factorizados “ M_{ua} ” y “ M_{ub} ” son las ecuaciones (5) a (8). Pero en estas ecuaciones se sustituye $M_{ux} = 0$ y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.

Caso II-XA

Para $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexión) y $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2$ (momento) son:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) dx dy \quad (17)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) dy dx \quad (18)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (19)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (20)$$

Caso II-XB

Para $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexión) y $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2$ (momento) son:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) dx dy \quad (21)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) dy dx \quad (22)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (23)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (24)$$

Nota: la ecuación (3) se sustituye en las ecuaciones (17) a (24) y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.

2.1.2. Cortantes por penetración o punzonamiento

La Figura 4 muestra las secciones críticas para cortantes por punzonamiento de cuatro casos posibles: Caso I-Y cuando P se ubica en el eje Y, y dentro del núcleo central. Caso II-Y cuando P se ubica en el eje Y, y fuera del núcleo central: Caso II-YA cuando el eje neutro se ubica $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d/2$; Caso II-YB cuando el eje neutro se localiza $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d/2$. Caso I-X cuando P se localiza en el eje X, y dentro del núcleo central. Caso II-X cuando P se localiza en el eje X, y fuera del núcleo central: Caso II-XA cuando el eje neutro se localiza $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d/2$; Caso II-XB cuando el eje neutro se localiza $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d/2$.

La ecuación general para el cortante por punzonamiento factorizado “ V_{up} ” es:

Caso I-Y

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_1}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_u(x, y) dx dy \quad (25)$$

Nota: la ecuación (1) se sustituye en la ecuación (25) y $M_{uy} = 0$, y se desarrolla la integral para obtener la ecuación final.

Caso II-YA

Para $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d/2$ es:

$$V_{up} = P_u \quad (26)$$

Caso II-YB

Para $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d/2$ es:

$$V_{up} = P_u - \int_{y_s}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (27)$$

donde: $-c_1/2 - d/2 \leq y_s \leq c_1/2 + d/2$

Nota: la ecuación (2) se sustituye en la ecuación (27) y se desarrolla la integral para obtener la ecuación final.

Caso I-X

La ecuación (1) se sustituye en la ecuación (25) y $M_{ux} = 0$ y se desarrolla la integral para obtener la ecuación final.

Caso II-XA

Para $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d/2$ es la ecuación (26).

Caso II-XB

Para $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d/2$ es:

$$V_{up} = P_u - \int_{x_s}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{-\frac{c_1}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (28)$$

donde: $-c_2/2 - d/2 \leq x_s \leq c_2/2 + d/2$.

Nota: la ecuación (3) se sustituye en la ecuación (28) y se desarrolla la integral para obtener la ecuación final.

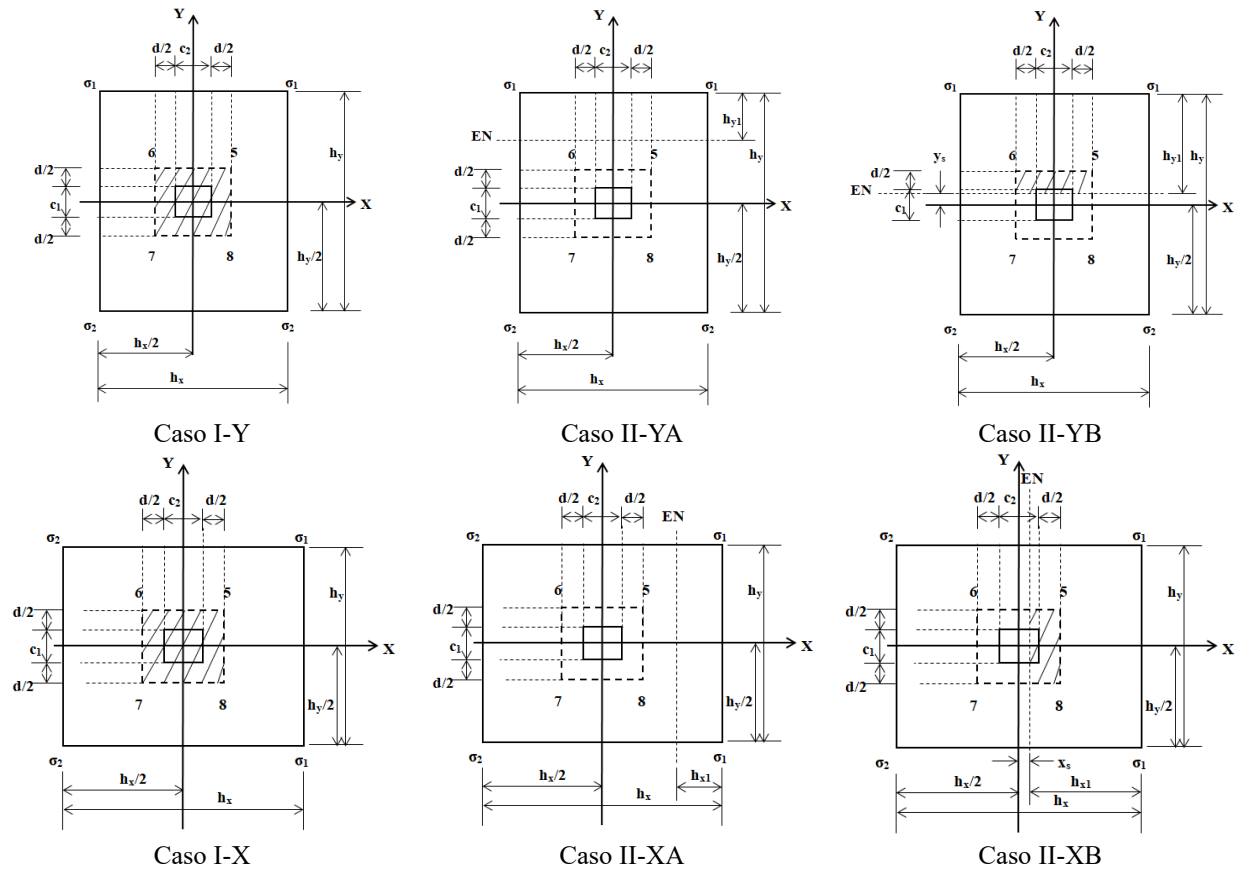


Figura 4. Cortantes por punzonamiento para flexión uniaxial
Fuente: Elaboración propia

2.2. Zapata aislada rectangular sometida a flexión biaxial

La Figura 5 muestra los cinco casos posibles para obtener el área mínima de una zapata aislada rectangular sometida a flexión biaxial.

Para el caso I, se considera que la superficie total de la zapata trabaja a compresión. La presión generada por el suelo sobre la zapata se obtiene mediante la ecuación (1) (flexión biaxial).

Para los casos II, III, IV y V, se consideran que la superficie total de la zapata trabaja parcialmente a compresión, es decir, parte de la superficie tiene presión cero. La presión generada por el suelo sobre la zapata se obtiene mediante la ecuación (4).

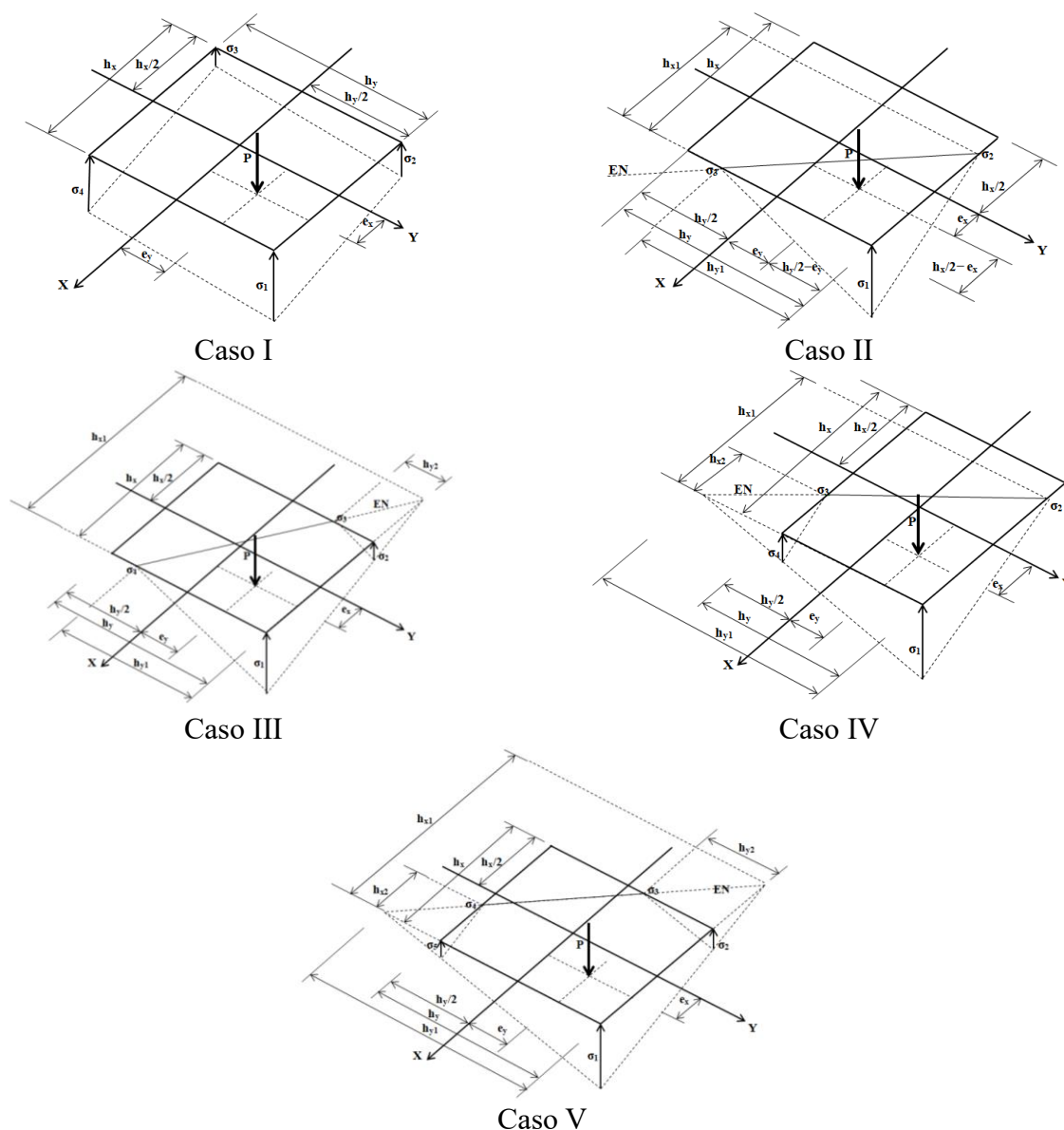
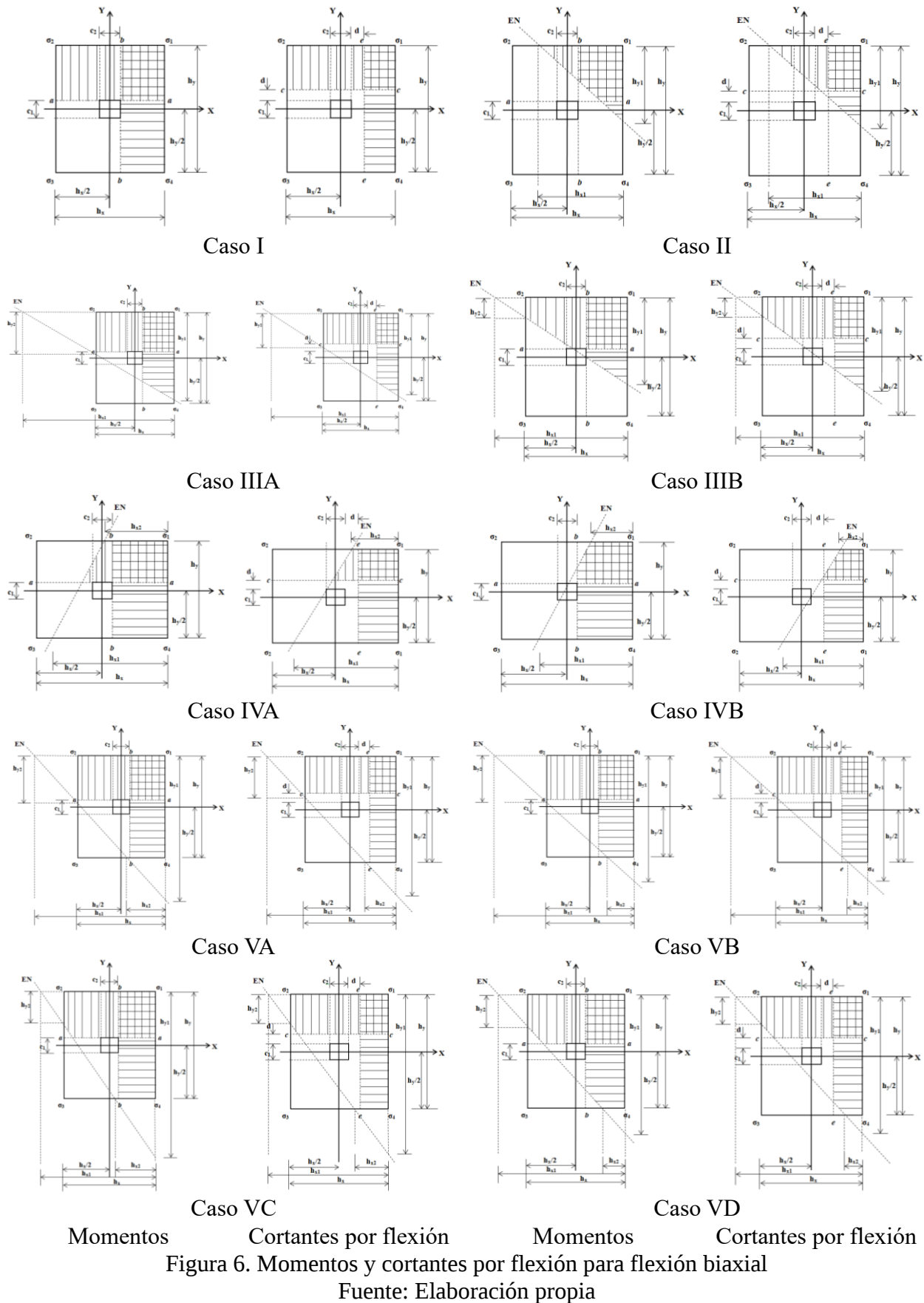


Figura 5. Cinco casos posibles de área mínima para flexión biaxial
Fuente: Elaboración propia a partir de Vela-Moreno et al. (2022)

2.2.1. Cortantes por flexión y momentos

La Figura 6 muestra las secciones críticas para momentos y cortantes por flexión para todos los casos posibles.

Las ecuaciones generales en los ejes “c” y “e” para los cortantes por flexión factorizados “ V_{uc} ” y “ V_{ue} ”, en los ejes “a” y “b” para los momentos factorizados “ M_{ua} ” y “ M_{ub} ” son:



Caso I

Cuando P se ubica dentro del núcleo central.

La ecuación (1) se sustituye en las ecuaciones (5) a (8) y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.

Caso II

Cuando P se ubica fuera del núcleo central.

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{y1}(h_y-2y)}{2h_{x1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (29)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (30)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{y1}(h_y-2y)}{2h_{x1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (31)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (32)$$

Caso III

Cuando P se ubica fuera del núcleo central de dos casos posibles: Caso IIIA cuando el eje neutro se ubica $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ (momento) y $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexión); Caso IIIB cuando el eje neutro se localiza $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ (momento) y $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexión).

Caso IIIA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (33)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (34)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (35)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (36)$$

Caso IIIB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (37)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (38)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (39)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (40)$$

donde: $h_{y2} = h_{y1}(h_{x1} - h_x)/h_{x1}$.

Caso IV

Cuando P se ubica fuera del núcleo central de dos casos posibles: Caso IVA cuando el eje neutro se ubica $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento) y $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexión); Caso IVB cuando el eje neutro está localizado $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento) y $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexión).

Caso IVA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (41)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (42)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (43)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (44)$$

Caso IVB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (45)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (46)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (47)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \\ + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (48)$$

donde: $h_{x2} = h_{x1}(h_{y1} - h_y)/h_{y1}$.

Caso V

Cuando P se ubica fuera del núcleo central de cuatro casos posibles: Caso VA cuando el eje neutro se ubica $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ y $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexión), y $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ y $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento); Caso VB cuando el eje neutro está localizado $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ y $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexión), y $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ y $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento); Caso VC cuando el eje neutro está localizado $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ y $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexión), y $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ y $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento); Caso VD cuando el eje neutro está localizado $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ y $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexión) y $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ y $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento).

Caso VA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (49)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (50)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (51)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (52)$$

Caso VB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (53)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (54)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (55)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (56)$$

Caso VC

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (57)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (58)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (59)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (60)$$

Caso VD

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) dx dy \quad (61)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) dy dx \quad (62)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2}+\frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x,y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (63)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2}+\frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x,y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (64)$$

Nota: la ecuación (4) se sustituye en las ecuaciones (29) a (64) y se desarrollan las integrales para obtener las ecuaciones finales.

2.2.2. Cortantes por penetración o punzonamiento

La Figura 7 muestra las secciones críticas por punzonamiento de seis posibles casos (Perímetro crítico formado por los puntos 5, 6, 7 y 8).

Para el caso I se considera que la superficie total de la zapata trabaja a compresión. La presión generada por el suelo sobre la zapata se obtiene mediante la ecuación (1) (flexión biaxial).

Para los casos II, III, IV, V y VI se consideran que la superficie total de la zapata trabaja parcialmente a compresión, es decir, parte de la superficie tiene presión cero. La presión generada por el suelo sobre la zapata se obtiene mediante la ecuación (4).

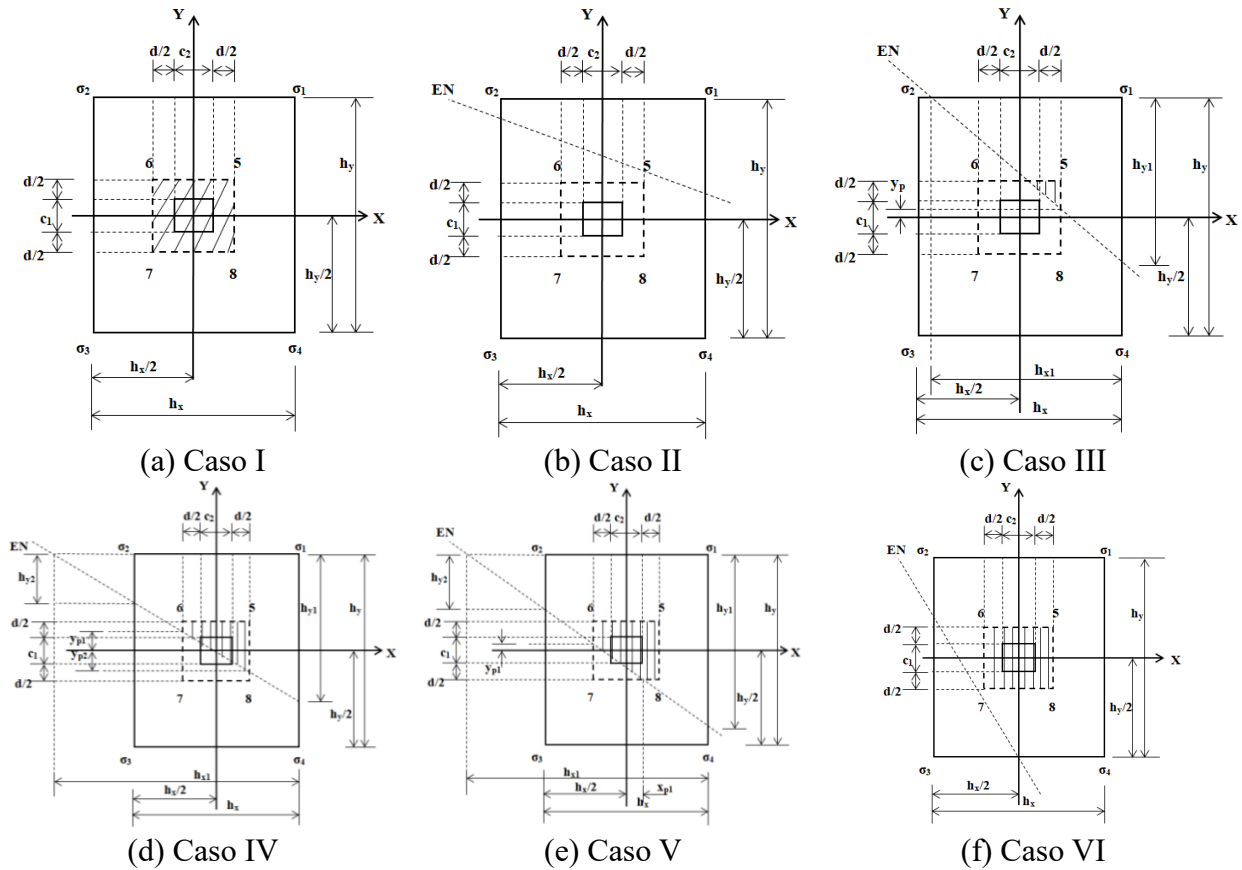


Figura 7. Cortantes por punzonamiento para flexión biaxial

Fuente: Elaboración propia

La ecuación general para el cortante por punzonamiento factorizado “ V_{up} ” es:

Caso I

La ecuación (1) se sustituye en la ecuación (25) y se desarrolla la integral para obtener la ecuación final.

Caso II

El eje neutro no alcanza el perímetro de la sección crítica, por lo tanto, es la ecuación (26).

Caso III

$$V_{up} = P_u - \int_{y_p}^{\frac{c_1}{2} + \frac{d}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} - \frac{h_{x1}(2y - h_y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{c_2}{2} + \frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (65)$$

donde: $y_p = h_y/2 - h_{y1}(c_2 + d - h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$ (Si el eje neutro cruza el perímetro crítico por el lado formado por los puntos 5 y 8) y $y_p = -c_1/2 - d/2$ (Si el eje neutro cruza el perímetro crítico por el lado formado por los puntos 7 y 8).

Caso IV

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}-\frac{h_{y1}(2x-h_x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx - \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{y_{p1}}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (66)$$

donde: $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Caso V

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{x_{p1}} \int_{\frac{h_y}{2}-\frac{h_{y1}(2x-h_x)}{2h_{x1}}-h_{y1}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx - \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{y_{p1}}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \\ - \int_{x_{p1}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{-\frac{c_1}{2}-\frac{d}{2}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (67)$$

donde: $x_{p1} = h_x/2 - h_{x1}(c_1 + d - h_y)/2h_{y1} - h_{x1}$ y $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Caso VI

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_2}{2}+\frac{d}{2}} \int_{-\frac{c_1}{2}-\frac{d}{2}}^{\frac{c_1}{2}+\frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (68)$$

donde: $x_{p1} = h_x/2 - h_{x1}(c_1 + d - h_y)/2h_{y1} - h_{x1}$ y $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Nota: La ecuación (4) se sustituye en las ecuaciones (65) a (68) y se desarrolla la integral para obtener las ecuaciones finales.

3. RESULTADOS

En este apartado se describe la aplicación del nuevo modelo presentado en este documento, utilizando los mismos ejemplos para obtener el área mínima y los lados de una zapata aislada rectangular propuesta por Vela-Moreno et al., (2022).

En las Tablas 1 y 2 se presentan los cuatro casos para obtener el diseño completo de las zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión uniaxial. Dos casos cuando la carga axial se encuentra sobre el eje Y: Caso I-Y, cuando toda el área de contacto trabaja a compresión; Caso II-Y, cuando el área de contacto trabaja parcialmente en compresión. Dos casos cuando la carga axial se encuentra sobre el eje X: Caso I-X, cuando toda el área de contacto trabaja a compresión; Caso II-X, cuando el área de contacto trabaja parcialmente en compresión.

La Tabla 1 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 0$ kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m².

El procedimiento utilizado es el siguiente:

Para el caso I-Y: Sustituyendo P_u , M_{ux} , $M_{uy} = 0$, h_x , h_y en la ecuación (1), y posteriormente se sustituye la ecuación (1), h_x , h_y , c_1 , c_2 y d en las ecuaciones (5) a (8) y (25).

Para el caso II-Y: Sustituyendo σ_{umax} , h_y , h_{y1} en la ecuación (2), y posteriormente se sustituye la ecuación (2), h_x , h_y , h_{y1} , c_1 , c_2 y d en las ecuaciones (9) a (12) o (13) a (16), y (26) o (27) según sea el caso.

El valor de d se fija por las ecuaciones propuestas por (ACI 318S-19).

Tabla 1. Diseño completo de la zapata cuando la carga axial se encuentra en el eje Y.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I-Y	360	1.00	3.65	52	410.97	32.40	342.89	*	553.04	22.00	17.32	22.80 (8Ø3/4")	1.65	63.20	65.55 (23Ø3/4")
II-Y		1.33	3.00	32	240.38	40.54	272.63	54.38	655.20	21.10	14.17	22.80 (8Ø3/4")	3.37	31.97	34.20 (12Ø3/4")
I-Y	720	1.00	6.00	67	794.45	32.40	420.46	*	582.61	33.32	22.31	34.20 (12Ø3/4")	1.28	133.87	136.89 (27Ø1")
II-Y		1.00	4.67	52	468.41	22.50	322.24	*	631.92	25.28	17.32	25.65 (9Ø3/4")	1.15	80.87	81.12 (16Ø1")
I-Y	1440	2.00	12.00	42	1693.21	115.20	500.88	136.80	699.83	130.51	27.97	131.82 (26Ø1")	7.27	167.83	172.38 (34Ø1")
II-Y		2.00	5.33	42	894.98	80.00	499.75	95.00	720.00	61.71	27.97	65.91 (13Ø1")	5.05	74.55	76.95 (27Ø3/4")
I-Y	2160	2.00	18.00	52	2592.81	115.20	510.05	100.80	703.07	161.36	34.63	162.24 (32Ø1")	5.87	311.69	314.34 (62Ø1")
II-Y		2.00	7.33	37	1268.16	80.00	350.12	107.50	720.00	109.86	24.64	111.54 (22Ø1")	5.73	90.31	91.20 (32Ø3/4")

donde: A_{smy} y A_{smx} son las áreas de acero generadas por los momentos en los ejes a (dirección Y) y b (dirección X), A_{sminy} y A_{sminx} son las áreas de acero mínimas en ambas direcciones, A_{spy} y A_{spx} son las áreas de acero propuestas en las direcciones Y y X (ACI 318S-19). * El eje se ubica fuera del área de la zapata.

La Tabla 2 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 0$ kN-m, $M_{uy} = 360$, 720, 1440, 2160 kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m² (mismo procedimiento utilizado en la Tabla 1, pero con las ecuaciones correspondientes).

Tabla 2. Diseño completo de la zapata cuando la carga axial se encuentra en el eje X.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{uy} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I-X	360	3.65	1.00	52	32.40	410.97	*	342.89	553.04	1.65	63.20	65.55 (23Ø3/4")	22.00	17.32	22.80 (8Ø3/4")
II-X		3.00	1.33	32	40.54	240.38	54.38	272.63	655.20	3.37	31.97	34.20 (12Ø3/4")	21.10	14.17	22.80 (8Ø3/4")
I-X	720	6.00	1.00	67	32.40	794.45	*	420.46	582.61	1.28	133.87	136.89 (27Ø1")	33.32	22.31	34.20 (12Ø3/4")
II-X		4.67	1.00	52	22.50	468.41	*	322.24	631.92	1.15	80.87	81.12 (16Ø1")	25.28	17.32	25.65 (9Ø3/4")
I-X	1440	12.00	2.00	42	115.20	1693.21	136.80	500.88	699.83	7.27	167.83	172.38 (34Ø1")	130.51	27.97	131.82 (26Ø1")
II-X		5.33	2.00	42	80.00	894.98	95.00	499.75	720.00	5.05	74.55	76.95 (27Ø3/4")	61.71	27.97	65.91 (13Ø1")
I-X	2160	18.00	2.00	52	115.20	2592.81	100.80	510.05	703.07	5.87	311.69	314.34 (62Ø1")	161.36	34.63	162.24 (32Ø1")
II-X		7.33	2.00	37	80.00	1268.16	107.50	350.12	720.00	5.73	90.31	91.20 (32Ø3/4")	109.86	24.64	111.54 (22Ø1")

Las Tablas 1 y 2 presentan el diseño completo de las zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión uniaxial.

La Tabla 1 muestra lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por flexión en el eje c para los dos casos ($M_{ux} = 360$, 720, 1440 kN-m), y por el momento en el eje a para los dos casos ($M_{ux} = 2160$ kN-m). El peralte efectivo menor se presenta en el caso II-Y para $M_{ux} = 360$, 720, 2160 kN-m, y para $M_{ux} = 1440$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en el caso I-Y y II-Y. El área de acero propuesta más pequeña aparece en el caso II-Y para los dos casos en ambas direcciones

excepto en $M_{ux} = 360$ kN-m que son iguales en el caso I-Y y II-Y en la dirección Y.

En la Tabla 2 se presenta lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por flexión en el eje e para los dos casos ($M_{uy} = 360, 720, 1440$ kN-m), y por el momento en el eje b para los dos casos ($M_{uy} = 2160$ kN-m). El peralte efectivo menor se presenta en el caso II-X para $M_{uy} = 360, 720, 2160$ kN-m, y para $M_{uy} = 1440$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en el caso I-X y II-X. El área de acero propuesta más pequeña aparece en el caso II-X para los dos casos en ambas direcciones excepto en $M_{uy} = 360$ kN-m que son iguales en el caso I-X y II-X en la dirección X.

Las Tablas 3 a 6 presentan el diseño completo de las zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión biaxial.

Las Tablas 3 a 6 presentan los dos casos para obtener el diseño completo de las zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión biaxial, un caso cuando toda el área de contacto trabaja a compresión (Caso I), y otro caso cuando el área de contacto trabaja parcialmente a compresión (la menor área de los casos II, III, IV y V).

El procedimiento utilizado para las Tablas 3 a 6 es el siguiente:

Para el caso I: Sustituyendo $P_u, M_{ux}, M_{uy}, h_x, h_y$ en la ecuación (1), y posteriormente se sustituye la ecuación (1), h_x, h_y, c_1, c_2 y d en las ecuaciones (5) a (8) y (25).

Para los casos II, III, IV y V: Sustituyendo $\sigma_{umax}, h_x, h_{x1}, h_y, h_{y1}$ en la ecuación (4), y posteriormente se sustituye la ecuación (4), $h_x, h_{x1}, h_y, h_{y1}, c_1, c_2$ y d en las ecuaciones (29) a (32) (caso II), en las ecuaciones (33) a (36) (caso IIIA), en las ecuaciones (37) a (40) (caso IIIB), en las ecuaciones (41) a (44) (caso IVA), en las ecuaciones (45) a (48) (caso IVB), en las ecuaciones (49) a (52) (caso VA), en las ecuaciones (53) a (56) (caso VB), en las ecuaciones (57) a (60) (caso VC), en las ecuaciones (61) a (64) (caso VD), y (26), (65) a (68) según sea el caso.

La Tabla 3 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 360$ kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². El área más pequeña aparece en el caso V para $M_{ux} = 360$ y 720 kN-m, y en el caso II para $M_{ux} = 1440$ y 2160 kN-m.

Tabla 3. Diseño completo de la zapata para $M_{uy} = 360$ kN-m.

(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	6.00	6.00	27	632.43	632.43	391.39	391.39	711.02	65.04	53.95	65.55 (23Ø3/4")	65.04	53.95	65.55 (23Ø3/4")
V		2.72	2.72	22	229.25	229.25	305.04	305.04	698.58	29.25	19.93	31.35 (11Ø3/4")	29.25	19.93	31.35 (11Ø3/4")
I	720	6.00	12.00	27	1351.21	632.43	421.25	391.39	715.51	148.38	53.95	152.10 (30Ø1")	63.43	107.89	111.54 (22Ø1")
V		2.22	4.45	27	472.00	196.31	367.54	298.13	709.58	51.44	19.93	55.77 (11Ø1")	19.61	40.01	42.75 (15Ø3/4")
I	1440	6.00	24.00	32	2790.60	632.43	434.23	384.90	717.41	278.09	63.94	278.85 (55Ø1")	52.71	255.74	258.57 (51Ø1")
II		1.87	7.46	37	948.06	174.75	419.11	254.16	720.00	78.18	23.04	79.80 (16Ø1")	12.56	91.91	94.05 (33Ø3/4")
I	2160	6.00	36.00	42	4230.40	632.43	437.49	371.76	717.76	311.87	83.92	314.34 (62Ø1")	39.96	503.50	507.00 (100Ø1")
II		1.71	10.24	42	1428.46	165.34	447.01	210.14	720.00	109.68	23.02	111.54 (22Ø1")	10.44	143.22	145.35 (51Ø3/4")

La Tabla 3 muestra lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por punzonamiento para los dos casos ($M_{ux} = 360, 720$ kN-m), y por el momento en el eje a para los dos casos ($M_{ux} = 1440, 2160$ kN-m). El peralte efectivo más pequeño ocurre en el caso V para $M_{ux} = 360$ kN-m, el peralte efectivo más pequeño ocurre en el caso I para $M_{ux} = 1440$ kN-m, y para $M_{ux} = 720, 2160$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en ambos casos. El área de acero propuesta más grande aparece en el caso I para los dos casos en ambas direcciones.

La Tabla 4 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 720$ kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². El área más pequeña aparece en el caso V para $M_{ux} = 360$ kN-m, y en el caso II para $M_{ux} = 720, 1440$ y 2160 kN-m.

Tabla 4. Diseño completo de la zapata para $M_{uy} = 720$ kN-m.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	12.00	6.00	27	632.43	1351.21	391.39	421.25	715.51	63.43	107.89	111.54 (22Ø1")	148.38	53.95	152.10 (30Ø1")
V		4.45	2.22	27	196.31	472.00	298.13	367.54	709.58	19.61	40.10	42.75 (15Ø3/4")	51.44	19.96	54.15 (19Ø3/4")
I	720	12.00	12.00	27	1351.21	1351.21	421.25	421.25	717.76	139.46	107.89	141.96 (28Ø1")	139.46	107.89	141.96 (28Ø1")
II		3.73	3.73	27	430.31	430.31	392.78	392.78	720.00	44.47	33.54	45.63 (9Ø1")	44.47	33.54	45.63 (9Ø1")
I	1440	12.00	24.00	27	2790.60	1351.21	435.76	421.25	718.88	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")	135.74	215.78	218.01 (51Ø1")
II		3.22	6.45	27	913.51	408.86	458.25	423.74	720.00	104.20	28.95	106.47 (21Ø1")	41.21	57.99	59.85 (21Ø3/4")
I	2160	12.00	36.00	27	4230.40	1351.21	440.54	421.25	719.25	508.33	107.89	512.07 (101Ø1")	134.59	323.68	324.48 (64Ø1")
II		3.00	9.00	32	1404.83	403.75	480.92	433.67	720.00	140.24	31.97	141.96 (28Ø1")	33.85	95.90	96.90 (34Ø3/4")

La Tabla 5 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 1440$ kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². El área más pequeña aparece en el caso II para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ y 2160 kN-m.

Tabla 5. Diseño completo de la zapata para $M_{uy} = 1440$ kN-m.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	24.00	6.00	32	632.43	2790.60	384.90	434.23	717.41	52.71	255.74	258.57 (51Ø1")	278.09	63.94	278.85 (55Ø1")
II		7.46	1.87	37	174.75	948.06	254.16	419.11	720.00	12.56	91.91	94.05 (33Ø3/4")	78.18	23.04	79.80 (16Ø1")
I	720	24.00	12.00	27	1351.21	2790.60	421.25	435.76	718.88	135.74	215.78	218.01 (51Ø1")	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")
II		6.45	3.22	27	408.86	913.51	423.74	458.25	720.00	41.21	57.99	59.85 (21Ø3/4")	104.20	28.95	106.47 (21Ø1")
I	1440	24.00	24.00	27	2790.60	2790.60	435.76	435.76	719.44	288.54	215.78	288.99 (57Ø1")	288.54	215.78	288.99 (57Ø1")
II		5.73	5.73	27	899.07	899.07	484.27	484.27	720.00	94.95	51.52	96.33 (19Ø1")	94.95	51.52	96.33 (19Ø1")
I	2160	24.00	36.00	27	4230.40	2790.60	440.54	435.76	719.63	451.51	215.78	456.30 (90Ø1")	283.13	323.68	324.48 (64Ø1")
II		5.41	8.12	32	1399.94	898.75	498.17	495.32	720.00	157.03	48.64	157.17 (31Ø1")	92.67	73.01	94.05 (33Ø3/4")

La Tabla 4 muestra lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por punzonamiento para los dos casos ($M_{ux} = 360, 720, 1440$ kN-m), y por el momento en el eje a para los dos casos ($M_{ux} = 2160$ kN-m). El peralte efectivo menor ocurre en el caso I para $M_{ux} = 2160$ kN-m, y para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en ambos casos. El área de acero propuesta más grande aparece en el caso I para los dos casos en ambas direcciones.

La Tabla 5 muestra lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por punzonamiento para los dos casos ($M_{ux} = 720, 1440, 2160$ kN-m), y por el momento en el eje a para los dos casos ($M_{ux} = 360$ kN-m). El peralte efectivo menor ocurre en el caso I para $M_{ux} = 360$ kN-m, y para $M_{ux} = 720, 1440, 2160$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en ambos casos. El área de acero propuesta

Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión

más grande aparece en el caso I para los dos casos en ambas direcciones.

La Tabla 6 muestra los resultados para c_1 y $c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 2160$ kN-m y $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². El área más pequeña aparece en el caso II para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ y 2160 kN-m.

Tabla 6. Diseño completo de la zapata para $M_{uy} = 2160$ kN-m.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spx} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	36.00	6.00	42	632.43	4230.40	371.76	437.49	717.76	39.96	503.50	507.00 (100Ø1")	311.87	83.92	314.34 (62Ø1")
II		10.24	1.71	42	165.34	1428.46	210.14	447.01	720.00	10.44	143.22	145.35 (51Ø3/4")	109.68	23.92	111.54 (22Ø1")
I	720	36.00	12.00	27	1351.21	4230.40	421.25	440.54	719.63	134.59	323.68	324.48 (64Ø1")	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")
II		9.00	3.00	32	403.75	1404.83	433.67	480.92	720.00	33.85	95.90	96.90 (34Ø3/4")	140.24	31.97	141.96 (28Ø1")
I	1440	36.00	24.00	27	2790.60	4230.40	435.76	440.54	719.44	283.13	323.68	324.48 (64Ø1")	451.51	215.78	456.30 (90Ø1")
II		8.12	5.41	27	898.75	1399.94	495.32	498.17	720.00	92.67	73.01	94.05 (33Ø3/4")	157.03	48.64	157.17 (31Ø1")
I	2160	36.00	36.00	27	4230.40	4230.40	440.54	440.54	719.75	437.69	323.68	441.09 (87Ø1")	437.69	323.68	441.09 (87Ø1")
II		7.73	7.73	32	1396.69	1396.69	498.81	498.81	720.00	149.44	69.50	152.10 (30Ø1")	149.44	69.50	152.10 (30Ø1")

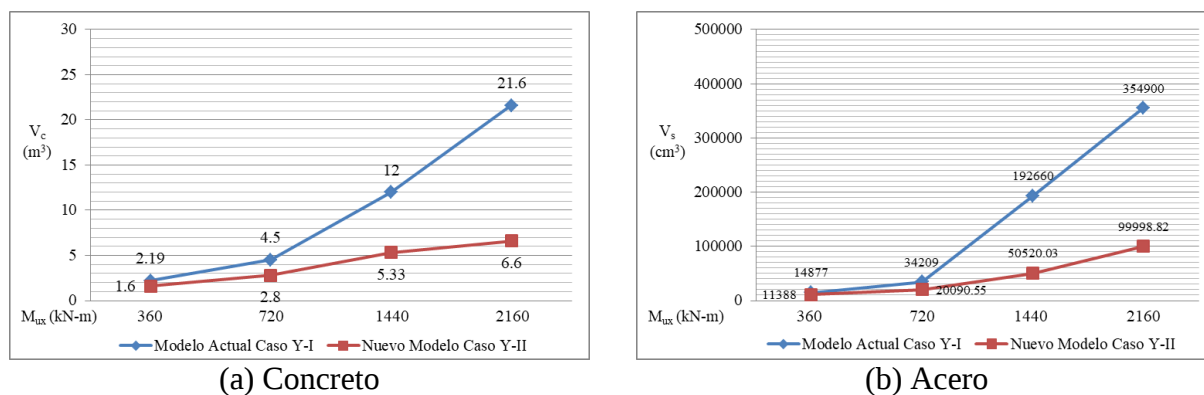
La Tabla 6 muestra lo siguiente: El peralte efectivo se rige por el cortante por punzonamiento para los dos casos ($M_{ux} = 1440, 2160$ kN-m), y por el momento en el eje a para los dos casos ($M_{ux} = 360, 720$ kN-m). El peralte efectivo menor ocurre en el caso I para $M_{ux} = 720$ kN-m, y para $M_{ux} = 360, 1440, 2160$ kN-m el peralte efectivo es el mismo en ambos casos. El área de acero propuesta más grande aparece en el caso I para los dos casos en ambas direcciones.

La Figura 8 muestra la comparación para la flexión uniaxial (carga axial sobre el eje Y) del modelo actual (Caso I-Y) y el nuevo modelo (Caso II-Y) en términos de volumen de concreto y acero de los ejemplos considerados.

La Figura 8 muestra lo siguiente: El nuevo modelo presenta menores volúmenes de concreto y acero en todos los casos que el modelo actual. La diferencia más pequeña en los volúmenes de concreto y acero ocurre en $M_{ux} = 360$ kN-m de 1.37 veces para concreto y 1.31 veces para acero. La mayor diferencia de volúmenes de concreto y acero se da en $M_{ux} = 2160$ kN-m de 3.27 veces para concreto y 3.55 veces para acero.

La Figura 9 muestra la comparación para la flexión uniaxial (carga axial sobre el eje X) del modelo actual (Caso I-X) y el nuevo modelo (Caso II-X) en términos de volumen de concreto y acero de los ejemplos considerados.

La Figura 9 muestra lo siguiente: El nuevo modelo presenta menores volúmenes de concreto y acero en todos los casos que el modelo actual. La diferencia más pequeña en los volúmenes de concreto y acero ocurre en $M_{uy} = 360$ kN-m de 1.37 veces para concreto y 1.31 veces para acero. La mayor diferencia de volúmenes de concreto y acero se da en $M_{uy} = 2160$ kN-m de 3.27 veces para concreto y 3.55 veces para acero.

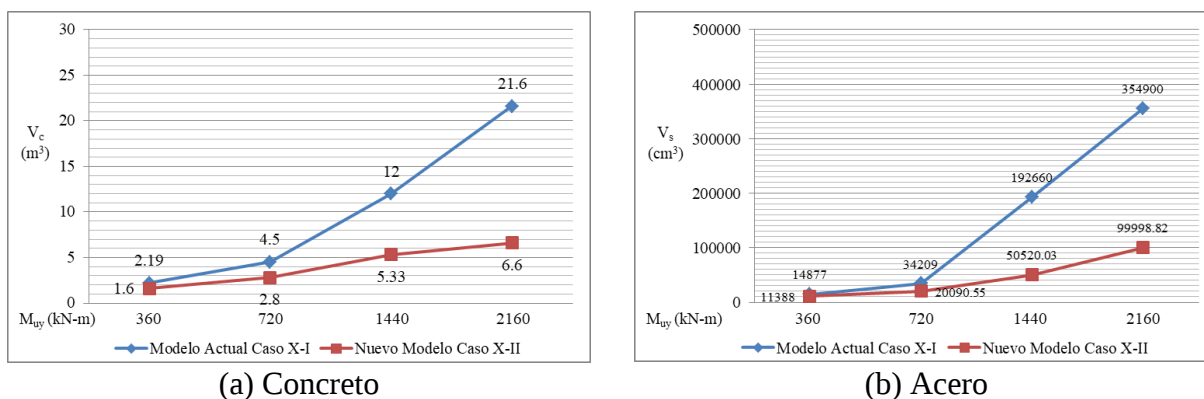


(a) Concreto

(b) Acero

Figura 8. Comparación para flexión uniaxial ($M_{uy} = 0$)

Fuente: Elaboración propia



(a) Concreto

(b) Acero

Figura 9. Comparación para flexión uniaxial ($M_{ux} = 0$)

Fuente: Elaboración propia

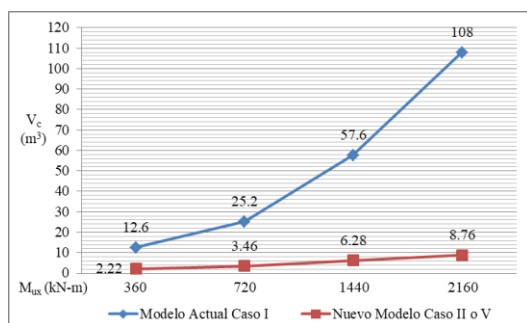
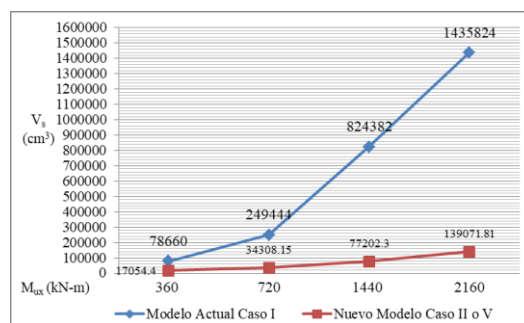
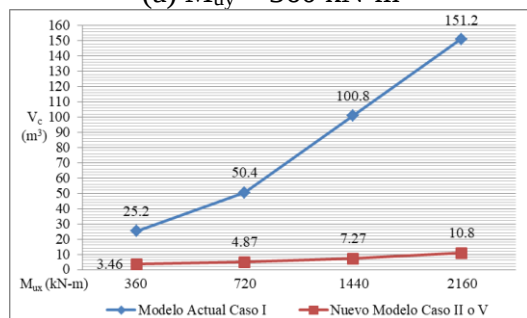
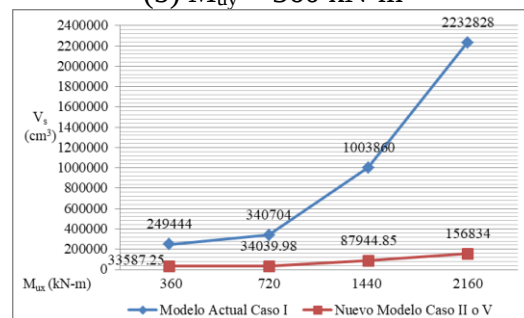
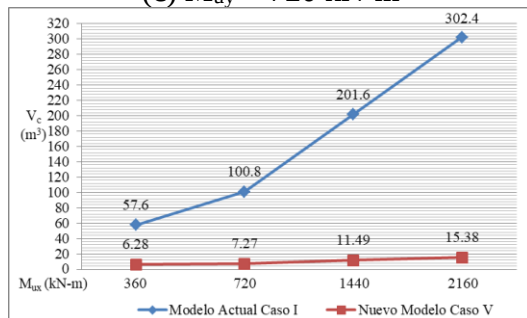
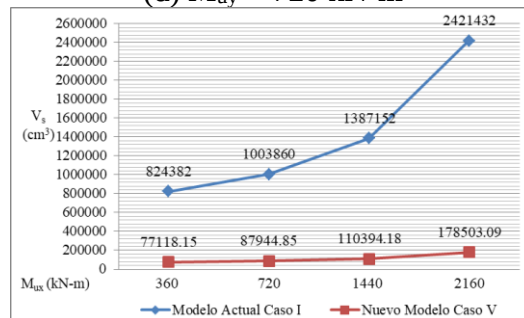
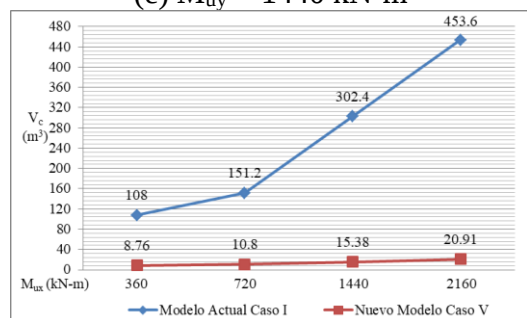
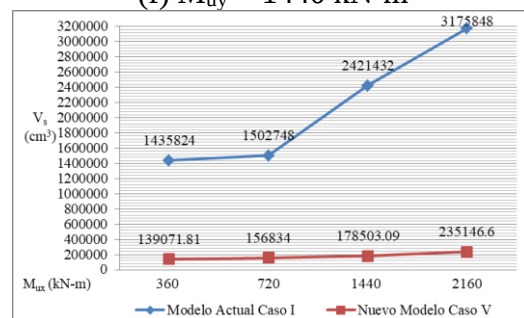
La Figura 10 muestra la comparación para la flexión biaxial del modelo actual (Caso I) y el nuevo modelo (Caso II o V) en términos de volumen de concreto y acero de los ejemplos considerados.

La Figura 10 muestra lo siguiente:

El nuevo modelo presenta menores volúmenes de concreto y acero en todos los casos que el modelo actual.

Las diferencias más pequeñas se presentan en $M_{ux} = 360$ kN-m para todos los casos en los volúmenes de concreto y acero de 5.68 veces para concreto y 4.61 veces para acero ($M_{uy} = 360$ kN-m), 7.28 veces para concreto y 7.43 veces para acero ($M_{uy} = 720$ kN-m), 9.17 veces para concreto y 10.69 veces para acero ($M_{uy} = 1440$ kN-m), 12.33 veces para concreto y 10.32 veces para acero ($M_{uy} = 2160$ kN-m).

Las diferencias más grandes se presentan en $M_{ux} = 2160$ kN-m para todos los casos en los volúmenes de concreto y acero de 12.33 veces para concreto y 10.32 veces para acero ($M_{uy} = 360$ kN-m), 14.00 veces para concreto y 14.24 veces para acero ($M_{uy} = 720$ kN-m), 19.66 veces para concreto y 13.57 veces para acero ($M_{uy} = 1440$ kN-m), 21.69 veces para concreto y 13.51 veces para acero ($M_{uy} = 2160$ kN-m).


(a) $M_{uy} = 360$ kN-m

(b) $M_{uy} = 360$ kN-m

(c) $M_{uy} = 720$ kN-m

(d) $M_{uy} = 720$ kN-m

(e) $M_{uy} = 1440$ kN-m

(f) $M_{uy} = 1440$ kN-m

(g) $M_{uy} = 2160$ kN-m

(h) $M_{uy} = 2160$ kN-m

Concreto

Acero

Figura 10. Comparación para flexión biaxial

Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un nuevo modelo matemático de diseño completo para obtener los espesores y áreas del acero transversal y longitudinal para zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión uniaxial y biaxial apoyadas sobre suelos elásticos, que considera la superficie total trabajando parcialmente a compresión y se asume que la distribución de la presión sobre el suelo es lineal. Las principales contribuciones de este trabajo para estos ejemplos son:

Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión

- 1.- Este trabajo muestra una reducción significativa en los volúmenes de concreto y acero respecto al modelo actual, si la superficie de contacto con el suelo trabaja parcialmente a compresión.
- 2.- Este trabajo muestra una reducción significativa en el volumen de excavación respecto al modelo actual, debido a que el nuevo modelo ocupa menos volumen.
- 3.- Los espesores para ambos modelos se rigen por momentos y cortantes por flexión para flexión uniaxial, y por momentos y cortante por punzonamiento para flexión biaxial.
- 4.- El nuevo modelo puede ser utilizado para cualquier reglamento de edificación, simplemente tomando en cuenta los momentos, los cortantes por flexión y los cortantes por punzonamiento que resisten para definir el peralte efectivo, y las ecuaciones para determinar las áreas de acero de refuerzo propuestas por cada reglamento de edificación.
- 5.- El nuevo modelo se puede usar cuando la carga P_u se ubica fuera del núcleo central ($e_x/h_x + e_y/h_y > 1/6$), y el modelo actual se usa cuando la carga P_u se ubica dentro del núcleo central ($e_x/h_x + e_y/h_y \leq 1/6$), donde $e_x = M_y/P$ y $e_y = M_x/P$.

Este trabajo muestra una solución eficaz y robusta aplicada para obtener el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares sometidas a flexión uniaxial y biaxial apoyadas sobre suelos elásticos que trabajan parcialmente a compresión, y la variación del diagrama de presión es lineal. Las sugerencias para la próxima investigación:

- 1.- Diseño completo para zapatas combinadas (rectangulares, trapezoidales, correas, de esquina y en forma de T) sometidas a flexión uniaxial y biaxial apoyadas sobre suelos elásticos trabajando parcialmente a compresión.
- 2.- Zapatas apoyadas sobre suelos totalmente cohesivos (suelos arcillosos) y/o suelos totalmente granulares (suelos arenosos), el diagrama de presión es diferente, debido a que el diagrama de presiones no es lineal como se presenta en este trabajo.

5. REFERENCIAS

- ACI 318S-19 (2019), “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Committee 318”, New York, USA.
- Aguilera-Mancilla, G., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2019), *Modeling for the strap combined footings Part I: Optimal dimensioning*. Steel and Composite Structures. 30(2):97-108. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.2.097>
- Al-Gahtani, H.J. and Adekunle, S.K. (2019), *A boundary-type approach for the computation of vertical stresses in soil due to arbitrarily shaped foundations*. World Journal of Engineering. 16(3): 419-426. <https://doi.org/10.1108/WJE-02-2018-0051>
- Algin, H.M. (2000), *Stresses from linearly distributed pressures over rectangular areas*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 24(8):681-692. [https://doi.org/10.1002/1096-9853\(200007\)24:8<681::AID-NAG89>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1096-9853(200007)24:8<681::AID-NAG89>3.0.CO;2-X)
- Algin, H.M. (2007), *Practical formula for dimensioning a rectangular footing*. Engineering Structures. 29(6):1128-1134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.009>
- Aydogdu, I. (2016), *New Iterative method to Calculate Base Stress of Footings under Biaxial Bending*. Journal of Engineering and Applied Sciences. 8(4):40-48. <https://doi.org/10.24107/ijeas.281460>
- Bezmalinovic Colleoni, A.S. (2016), *Fórmulas analíticas para la presión de contacto lineal en fundaciones rectangulares altamente excéntricas*. IX Chilean Congress on Geotechnical Engineering, Chilean Geotechnical Society, Universidad Austral de Chile.
- Dagdeviren, U. (2016), *Shear stresses below the rectangular foundations subjected to biaxial bending*, Geomechanics Engineering. 10(2):189-205. <https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.2.189>

- Filho, W.L., Carvalho, R.CH., Christoforo, A.L. and Lahr, F.A.R. (2017), *Dimensioning of Isolated Footing Submitted to the under Biaxial Bending Considering the Low Concrete Consumption*. International Journal of Materials Engineering. 7(1):1-11. <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20170701.01.html>
- Galvis, F.A. and Smith-Pardo, J.P. (2020), *Axial load biaxial moment interaction (PMM) diagrams for shallow foundations: Design aids, experimental verification, and examples*. Engineering Structures. 213:110582. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110582>
- Girgin, K. (2017), *Simplified formulations for the determination of rotational spring constants in rigid spread footings resting on tensionless soil*. Journal Civil Engineering and Management. 23(4):464-474. <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1210218>
- Gör, M. (2022), *Analyzing the bearing capacity of shallow foundations on two-layered soil using two novel cosmology-based optimization techniques*. Smart Structures and Systems. 29(3):513-522. <https://doi.org/10.12989/sss.2022.29.3.513>
- Irles-Más, R. and Irles-Más, F. (1992), *Alternativa analítica a la determinación de tensiones bajo zapatas rectangulares con flexión biaxial y despegue parcial*. Informes de la Construcción. 44(419):77-89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2768804>
- Jahanandish, M., Veiskarami, M. and Ghahramani, A. (2012), *Effect of Foundation Size and Roughness on the Bearing Capacity Factor, N_γ , by Stress Level-Based ZEL Method*. Arabian Journal for Science and Engineering. 37(7):1817-1831. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0293-3>
- Kaur, A. and Kumar, A. (2016), *Behavior of eccentrically inclined loaded footing resting on fiber reinforced soil*. Geomechanics Engineering. 10(2):155-174. <https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.2.155>
- Khajehzadeh, M., Taha M.R. and Eslami, M. (2014), *Multi-objective Optimization of foundation using global-local gravitational search algorithm*. Structural Engineering and Mechanics. 50(3): 257-273. <https://doi.org/10.12989/sem.2014.50.3.257>
- Kim-Sánchez, D.S., Luévanos-Rojas, A., Barquero-Cabrero, J.D., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M. and Luévanos-Soto, I. (2022). *A New Model for the Complete Design of Circular Isolated Footings Considering that the Contact Surface Works Partially under Compression*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 18(6):1769-1784. <http://www.ijicic.org/ijicic-180607.pdf>
- Lee, J., Jeong, S. and Lee, J.K. (2015), *3D analytical method for mat foundations considering coupled soil springs*. Geomechanics Engineering. 8(6):845-850. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.6.845>
- Lezgy-Nazargah, M., Mamazizi, A. and Khosravi, H. (2022), *Analysis of shallow footings rested on tensionless foundations using a mixed finite element model*. Structural Engineering and Mechanics. 81(3):379-394. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.81.3.379>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017a), *A mathematical model for dimensioning of square isolated footings using optimization techniques: general case*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 13(1):67-74. <http://www.ijicic.org/ijicic-130105.pdf>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017b), *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>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017c), *A new mathematical model for design of square isolated footings for general case*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 13(4):1149-1168. <http://www.ijicic.org/ijicic-130406.pdf>

- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A., Medina-Elizondo, M., Sandoval-Rivas, R. and Velázquez-Santillán, F. (2019), *Optimal design for the reinforced concrete circular isolated footings*. Advances in Computational Design. 4(3):273-294. <https://doi.org/10.12989/acd.2019.4.3.273>
- Luévanos-Rojas, A. (2012a), *A Mathematical Model for Dimensioning of Footings Square*. International Review of Civil Engineering. 3(4):346-350.
- Luévanos-Rojas, A. (2012b), *A Mathematical Model for the Dimensioning of Circular Footings*. Far East Journal of Mathematical Sciences. 71(2): 357-367.
- Luévanos-Rojas, A. (2013), *A Mathematical Model for Dimensioning of Footings Rectangular*. ICIC Express Letters Part B: Applications. 4(2):269-274.
- 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.ijicic.org/ijicic-12-10031.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2014a), *A Comparative Study for Dimensioning of Footings with Respect to the Contact Surface on Soil*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 10(4):1313-1326. <http://www.ijicic.org/ijicic-13-08003.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2014b), *Design of isolated footings of circular form using a new model*. Structural Engineering and Mechanics. 52(4):767-786. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.52.4.767>
- Luévanos-Rojas, A. (2014c), *Design of boundary combined footings of rectangular shape using a new model*. DYNA Colombia. 81(188):199-208. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.41800>
- Luévanos-Rojas, A. (2015a), *A New Approach for Dimensioning of Rectangular Footings Using Optimization Techniques*. ICIC Express Letters Part B: Applications. 6(11):3141-3146.
- Luévanos-Rojas, A. (2015b), *A New Mathematical Model for Dimensioning of the Boundary Trapezoidal Combined Footings*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 11(4):1269-1279. <http://www.ijicic.org/ijicic-110411.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2015c), *A new model for the design of rectangular combined boundary footings with two restricted opposite sides*. Revista ALCONPAT. 6(2):172-187. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.137>
- Luévanos-Rojas, A. (2015d), *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 Mathematical Model for the Dimensioning of Combined Footings of Rectangular Shape*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 39(1):3-9. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/21090/20946>
- Luévanos-Rojas, A. (2016b), *Un nuevo modelo para diseño de zapatas combinadas rectangulares de lindero con dos lados opuestos restringidos*. Revista ACONPAT. 6(2):173-189. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.137>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2017), *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., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2018a), *A new model for T-shaped combined footings Part I: Optimal dimensioning*. Geomechanics Engineering. 14(1):51-60. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.051>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2018b), *A new model for T-shaped combined footings Part II: Mathematical model for design*. Geomechanics Engineering. 14(1):61-69. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.061>

- 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):317-335. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.432>
- Özmen, G. (2011), *Determination of Base Stresses in Rectangular Footings under Biaxial Bending*. Teknik Dergi Digest. 22(4):1519-1535. http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7b559795bd3f63b_ek.pdf?dergi=472
- Rawat, S., Mittal, R.K. and Muthukumar, G. (2020), *Isolated Rectangular Footings under Biaxial Bending: A Critical Appraisal and Simplified Analysis Methodology*. Practice Periodical on Structural Design and Construction. 25(3):04020011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000471](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000471)
- Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013a), *Rigid Spread Footings Resting on Soil Subjected to Axial Load and Biaxial Bending. I: Simplified Analytical Method*. International Journal of Geomechanics. 13(2):109-119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000218)
- Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013b), *Rigid Spread Footings Resting on Soil Subjected to Axial Load and Biaxial Bending. II: Design Aids*. International Journal of Geomechanics. 13(2):120-131. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000210)
- Soto-Garcia, S., Luévanos-Rojas, A., Barquero-Cabrero, J.D., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., Farias-Montemayor, O.M. and Martinez-Aguilar, C. (2022). *A New Model for the Contact Surface With Soil of Circular Isolated Footings Considering that the Contact Surface Works Partially Under Compression*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 18(4):1103-1116. <http://www.ijicic.org/ijicic-180406.pdf>
- Vela-Moreno, V.B., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., Sandoval-Rivas, R. and Martinez-Aguilar, C. (2022), *Optimal area for rectangular isolated footings considering that contact surface works partially to compression*. Structural Engineering and Mechanics. 84(4):561-573. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.4.561>
- Velázquez-Santillán, F., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M. and Sandoval-Rivas, R. (2018), *Numerical experimentation for the optimal design for reinforced concrete rectangular combined footings*. Advances in Computational Design. 3(1):49-69. <https://doi.org/10.12989/acd.2018.3.1.049>
- 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>

Análisis de la correlación entre el estado de los pavimentos urbanos y elementos del sistema de drenaje

M. Diniz^{1*}  R. Melo¹ 

*Autor de Contacto: mariaingridydiniz@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.604>

Recibido: 09/05/2022 | Correcciones recibidas: 23/03/2023 | Aceptado: 29/03/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

La investigación en cuestión tuvo como objetivo analizar la correlación entre el índice de condición del pavimento y la condición de dos elementos de drenaje superficial: desagües pluviales y cunetas. El estudio fue realizado a partir del análisis de 19 tramos, distribuidos por el barrio de Tambaú, en João Pessoa-PB. El cálculo del estado de los pavimentos se realizó por el método PCI y el estado de los elementos de drenaje se verificó mediante análisis subjetivo. Los resultados de la investigación mostraron cuando los elementos encajan o no en las condiciones ideales, y aunque los elementos de drenaje son considerados en el desempeño del pavimento, la evaluación estadística mostró una débil correlación entre la condición del pavimento y los elementos de drenaje evaluados.

Palabras clave: sistemas de infraestructura; estadística; caminos urbanos.

Citar como: Diniz, M., Melo, R. (2023), "Análisis de la correlación entre el estado de los pavimentos urbanos y elementos del sistema de drenaje", Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 220 – 234, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.604>

¹ Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor 1 contribuyó con la actividad de revisión de literatura, recolección de datos, redacción del trabajo, discusión de resultados y conclusiones, correspondiente al 60% del trabajo, el autor 2 contribuyó con la actividad de la idea original, revisión del trabajo final, opiniones en las discusiones, correspondiente al 40%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Analysis of the drainage system between the condition of urban pavements and drainage elements

ABSTRACT

The research in question aimed to analyze the correlation between the pavement condition index and the condition of two surface drainage elements: storm drains and gutters. The study was carried out from the analysis of 19 stretches, distributed by the neighborhood of Tambaú, in João Pessoa-PB. The calculation for the condition of the pavements was performed by the PCI method and the condition of the drainage elements was verified by means of subjective analysis. The research results showed when the elements fit or not in the ideal conditions, and although the drainage elements are considered in the pavement performance, the statistical evaluation showed a weak correlation between the pavement condition and the evaluated drainage elements.

Keywords: infrastructure systems; statistic; urban roads.

Análise da correlação entre a condição de pavimentos urbanos e elementos do sistema de drenagem

RESUMO

A pesquisa em questão objetivou analisar a correlação entre o índice de condição dos pavimentos e a condição de dois elementos de drenagem superficial: bocas de lobo e sarjetas. O estudo foi realizado a partir da análise de 19 trechos, distribuídos pelo bairro de Tambaú, em João Pessoa-PB. O cálculo para a condição dos pavimentos foi realizado pelo método do PCI e a condição dos elementos de drenagem foi verificada por meio de análise subjetiva. Os resultados da pesquisa mostraram quando os elementos se enquadravam ou não nas condições ideais, e embora os elementos de drenagem sejam considerados no desempenho dos pavimentos, a avaliação estatística apresentou uma correlação fraca entre a condição dos pavimentos e os elementos de drenagem avaliados.

Palavras-chave: sistemas de infraestrutura; estatística; vias urbanas.

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

Consideradas como el principal medio de transporte, las carreteras son de gran importancia en el desarrollo del país (PIRES E MENDES, 2021), y para que las carreteras cumplan adecuadamente su función, deben tener un adecuado estado de conservación.

Un pavimento con una estructura que no se comporta adecuadamente puede tener consecuencias no deseadas. En esta perspectiva, el drenaje de una vía ayuda en su conservación, además de prevenir accidentes en las vías. Por lo tanto, uno de los principales objetivos del drenaje vial es proteger la infraestructura de la acción negativa del agua, como la reducción de la estructura del piso y el desmantelamiento de los vertederos (LIMA et al., 2022).

Según Pinheiro, Coutinho y Ferreira (2021), el sistema de drenaje es un elemento esencial en cuanto al desempeño de la mayoría de los elementos que componen una vía urbana. Aún según el autor, la correcta conducción del agua es la principal función del sistema de drenaje, pudiendo preservar las características de las capas de diseño del pavimento, como la base, sub-base y subrasante, además de asegurar una mayor durabilidad de los mismos. el pavimento de la calzada, además de evitar la acumulación de agua en la superficie.

Una forma de asegurarse de que el sistema de drenaje funciona correctamente es comprobando el buen estado de los elementos que lo componen. Además de la estructura, la limpieza y el mantenimiento de los elementos también son fundamentales para que el sistema cumpla con sus funciones de diseño.

Por lo tanto, el trabajo en cuestión se propuso evaluar la correlación entre el estado de los pavimentos seleccionados y el estado de dos elementos superficiales de drenaje de los tramos: alcantarillas y cunetas. A partir de la correlación se pretende conocer en qué medida influye el estado de conservación de los elementos de drenaje en el estado de los pavimentos. Finalmente, los responsables de la gestión de los sistemas de infraestructura pueden utilizar las métricas presentadas como ayuda para el mantenimiento y recuperación de las estructuras evaluadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pisos

Los pavimentos de las carreteras son de gran importancia de cara al desarrollo de un país al ayudar a la realización de servicios básicos, como el transporte de mercancías y el movimiento de la población. Dada su importancia, es necesario que las vías se encuentren en buen estado de conservación para que puedan ofrecer sus servicios de forma adecuada y segura para los usuarios (LIMA et al., 2022).

Una forma de comprobar si los pavimentos se encuentran en un estado de conservación aceptable es calcular su índice de estado. Una de estas evaluaciones se puede hacer desde Pavement Índice de condición (PCI), desarrollado por el Cuerpo de Ejército de los Estados Unidos Ingenieros (USACE) en 1976. Desarrollado inicialmente solo para la evaluación de pavimentos aeroportuarios, y posteriormente en 1979 adaptado a una versión específica para la evaluación de pavimentos viales y urbanos.

De acuerdo con ASTM D6433-2018 - Práctica estándar para carreteras y estacionamientos _ acera Encuestas de Índice de Condición, es necesario seleccionar una muestra de tamaño $225 \text{ m}^2 \pm 90 \text{ m}^2$. La evaluación consiste en realizar el levantamiento de defectos, además de la cantidad y severidad de cada uno de ellos. La Tabla 1 presenta los tipos de defectos que deben ser identificados durante la aplicación del método.

Tabla 1. Defectos del pavimento asfáltico y unidad de medida para el Método PCI

Defecto	Formulario de medición	Defecto	Formulario de medición
Piel de cocodrilo	Área	Parches	Área
Exudación	Área	Agregado Pulido	Área
Grieta en bloques	Área	Ollas	Unidad
Elevaciones/asentamientos	Metro	Cruce ferroviario	Área
Corrugación	Área	Hundimiento de huella de rueda	Área
hundimiento localizado	Área	Deslizamiento de masa	Área
Grieta de borde	Metro	Grietas por deslizamiento de masas	Área
Grietas de reflexión conjunta	Metro	Hinchazón	Área
Espacio entre el pavimento y el arcén	Metro	Tener puesto	Área
Grieta longitudinal y transversal	Metro	-	-

Fuente: ASTM (2018) - Adaptado

Para calcular el índice de condición del pavimento es necesario obtener los Valores de Deducción (DV) según el tipo, severidad y extensión del defecto, que representa la influencia que tiene en la condición del pavimento, que van de 0 a 100, donde 0 significa que el defecto no afecta la condición del pavimento y 100 significa que el defecto tiene la máxima interferencia perjudicial.

Los valores de DV se obtienen con la ayuda de ábacos disponibles en ASTM D6433-2018. Sumando los DV, es posible obtener el Valor de Deducción Total (VTD) para los pisos analizados con la ayuda de la ecuación 1.

$$VTD = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{mi} a(T_j, S_i, D_{ij}) \times F(t, q) \quad (1)$$

En que:

$a(T_j, S_i, D_{ij})$: función de pérdida de capacidad para atender tráfico, cuyas variables independientes son del tipo:

T_j : tipos de defectos;

S_i : niveles de severidad;

D_{ij} : densidades de defectos;

i : contador de tipos de defectos;

j : contador de niveles de gravedad;

p : número total de tipos de defectos;

mi : número de nivel de severidad para el tipo de defecto n ;

$F(t, q)$: factor de ajuste para reducir el efecto del exceso de tipos de defectos. (t) depende del número de funciones (a) , y (q) es el número de valores numéricos de las funciones (a) mayor que 5.

En posesión del VTD, es necesario corregirlo según el número de defectos presentes en cada sección, según el ábaco 20 de la misma norma. Por lo tanto, es posible encontrar el Monto de Deducción Corregido (VDC) y, por lo tanto, el valor de PCI resultante de la Ecuación 2.

$$PCI = 100 - VDC \quad (2)$$

A partir del valor obtenido para el PCI en el tramo analizado, el pavimento se clasifica según la Tabla 2, variando su valor de 0 (mal estado) a 100 (excelente estado).

Tabla 2. Clasificación PCI

Clasificación	valor pci
Excelente	86 – 100
Muy Bien	71 -85
Bien	56 – 70
Promedio	41 – 55
Malo	26 – 40
Muy Malo	11 - 25
Horrible	0 - 10

Fuente: Shahin (2005)

2.2 Drenaje de Pavimentos Urbanos

Según Corrêa y Dutra (2018), el sistema de drenaje puede ser entendido como el conjunto de elementos que tienen como objetivo garantizar la integridad de los caminos y su entorno, además de promover la seguridad de los usuarios. Dichos dispositivos dirigen el agua a un lugar adecuado, siendo debidamente planificados durante la construcción o restauración de una carretera (REIS, 2016).

Al referirse al sistema de drenaje urbano, es necesario entender su subdivisión en macrodrenaje y microdrenaje (RESPLANDES et al., 2021). Según el Departamento de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de São Paulo (2015), el drenaje macro puede definirse como un cursor que dirige un gran volumen de agua, como ríos y arroyos. En el caso del microdrenaje, se puede considerar como la parte del sistema encargada de dirigir el agua de lluvia al macrosistema. Este se compone de elementos como canalones, arquetas, arquetas, pozos de visita y galerías.

En el caso de los pavimentos urbanos de una vía, la existencia de un sistema de microdrenaje para la conducción del agua de lluvia es fundamental, ya que es necesario mantener dicha infraestructura esencial en condiciones óptimas de funcionamiento (SOUZA, 2012).

En cuanto a la acumulación de agua, ya sea superficial o subterránea, puede ser un factor perjudicial para las carreteras. Según Lima et al. (2022), la acumulación de agua en la calzada puede perjudicar gravemente las condiciones de adherencia de la calzada, pudiendo provocar accidentes.

En el caso de las inundaciones, también es posible observar daños significativos en los pavimentos y, en consecuencia, en la población. Además del cambio en el tráfico con la reducción visible de la seguridad, el agua es capaz de infiltrarse en las capas del pavimento, reduciendo su vida útil. El agua que queda contenida en las capas, además de la proveniente del nivel freático, puede causar daños como la reducción de la capacidad de soporte de la capa de subrasante, además de hundimiento e incluso ruptura (REIS, 2016).

3. MÉTODO DE TRABAJO

Para cumplir con el objetivo propuesto por la investigación, se desarrolló la siguiente secuencia de actividades:

- i) delimitación del área de estudio;
- ii) elaboración de formularios para la recolección de datos;
- iii) levantamiento de datos sobre el estado de los pavimentos;
- iv) levantamiento de datos sobre el estado de los elementos de drenaje;
- v) análisis de la correlación entre los resultados encontrados.

Los extractos evaluados son objeto de estudio de estudiantes de grado y posgrado de la Universidad Federal de Paraíba – UFPB. Debido a la disponibilidad de una base de datos sobre los tramos en cuestión (ítem 3.1) y por ser considerado un distrito turístico de la ciudad donde la calidad de las vías debe presentarse en óptimas condiciones, se decidió evaluar la correlación entre la información.

En cuanto a los pavimentos, el levantamiento de defectos fue realizado mediante el análisis de imágenes disponibles en la base de datos utilizada, utilizando el formulario disponible en la NBR 006/2003 – PRO. Para ayudar en la etapa de cuantificación de defectos, concomitantemente con la medición, se realizó un registro fotográfico de cada defecto para poder evaluar su severidad, auxiliando en la posterior utilización de los ábacos del anexo X3 de la Norma ASTM D6433 – 18, durante la etapa de calificación.

Para obtener datos sobre el sistema de drenaje urbano superficial se realizó un levantamiento de los elementos que componían la red, adaptado del estudio de Novaes et. Alabama. (2019), a partir del llenado de los formularios elaborados con el fin de cuantificar la existencia de drenajes pluviales y cunetas, así como la calificación de sus respectivas condiciones de conservación, las cuales pueden ser buenas, regulares o pésimas.

3.1 Caracterización de los Extractos

Los tramos evaluados se distribuyeron por todo el barrio de Tambaú, en la ciudad de João Pessoa - PB. Se escogieron caminos que contaran simultáneamente con pavimento flexible y sistema de drenaje superficial. La ubicación de las secciones se muestra en la Figura 1.

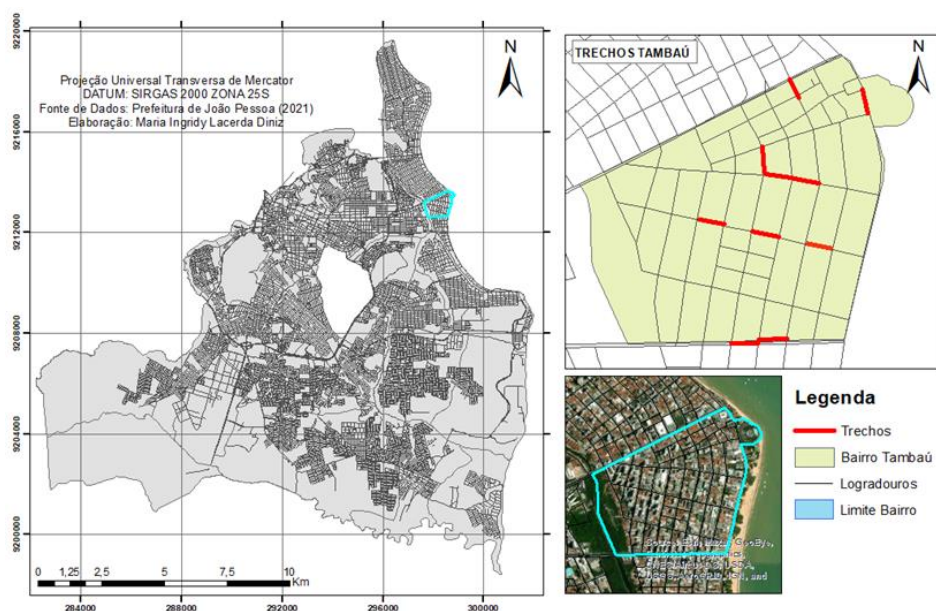


Figura 1. Ubicación del Área de Estudio y Extractos

La información se puede encontrar información detallada sobre las ubicaciones de cada sección en Tabla 3. Para mantener la proporcionalidad de las muestras, todas tenían la misma longitud de 80 metros.

Tabla 3. Información sobre las Secciones

Tramo	Rango	Camino	Sentido	Límites		Longitud (m)
				Comenzar	Final	
1	Izquierda	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	Tambaú - Manaíra	Espacio de luz del ser	Mercado de Artesanías - Av Ruy Carneiro	80
2	Bien	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	Tambaú - Manaíra	Espacio de luz del ser	Mercado de Artesanías - Av Ruy Carneiro	
3	Izquierda	AV. negociar	Playa	R Infante Dom Henrique	AV. Prof. María Sales	
4	Bien	AV. negociar	Playa	R Infante Dom Henrique	AV. Prof. María Sales	
5	Izquierda	AV. negociar	Playa	AV. Prof. María Sales	Calle N. Sra. dos Navegantes	
6	Bien	AV. negociar	Playa	AV. Prof. María Sales	Calle N. Sra. dos Navegantes	
7	Izquierda	Calle Infante Dom Henrique	Tambaú - Manaíra	Avenida negociar	AV. Olinda	
8	Bien	Calle Infante Dom Henrique	Tambaú - Manaíra	Avenida negociar	AV. Olinda	
9	Izquierda	Calle Helena Meira Lima	Centro	AV. Prof. María Sales	Calle Infante Dom Henrique	
10	Bien	Calle Helena Meira Lima	Centro	AV. Prof. María Sales	Calle Infante Dom Henrique	
11	Izquierda	Calle Helena Meira Lima	Centro	Calle Monteiro Lobato	Rua Silvino Lopes	
12	Bien	Calle Helena Meira Lima	Centro	Calle Monteiro Lobato	Antes del paso de peatones con Rua Silvino Lopes	
13	Izquierda	Calle Helena Meira Lima	Centro	AV. antonio lira	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	
14	Bien	Calle Helena Meira Lima	Centro	AV. antonio lira	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	
15	Izquierda	Rua Pres. Eptacio Pessoa	Besa	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	AV. Prof. María Sales	
16	Bien	Rua Pres. Eptacio Pessoa	Besa	Camino Nuestro Sra. dos Navegantes	AV. Prof. María Sales	
17	Izquierda	Rua Pres. Eptacio Pessoa	Besa	AV. Manoel Cavalcante de Sousa	AV. Prof. María Sales	
18	Bien	Rua Pres. Eptacio Pessoa	Besa	AV. Manoel Cavalcante de Sousa	AV. Prof. María Sales	
19	Bien	AV. Adm. Tamandaré	Besa	AV. Olinda	Cuadrado Esto Antonio	

3.2 Análisis Estadística

Es posible comprobar la existencia de la relación, así como la intensidad, existente entre dos variables del análisis de su correlación. Para ello, se utilizó el coeficiente de Correlación de Pearson (r) presentado por la ecuación 3 (MERGH, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]}} \quad (3)$$

En que:

n: número de pares de observaciones;

X_i: observación i de la variable X;

Y_i: observación i de la variable Y;

$\bar{X}$: promedio de los valores de X;

$\bar{Y}$: promedio de los valores de Y.

De acuerdo con Francisco & Dantas Neto (2021), es posible tomar descansos para ayudar con interpretación de los resultados de r, tal como se presentan en tabla 4.

Tabla 4. Interpretación de los Valores del Coeficiente de Correlación (r)

Coeficientes de correlación de Pearson (r)	Tipos de Correlaciones
r=1	Perfecto positivo
$0,8 \leq r < 1$	Fuerte positivo
$0,5 \leq r < 0,8$	Positivo moderado
$0,1 \leq r < 0,5$	Positivo débil
$0 < r < 0,1$	Íntimo Positivo
0	Nulo
$0,1 < r < 0$	Negativo íntimo
$-0,5 < r \leq -0,1$	Negativo débil
$-0,8 < r \leq -0,5$	Negativo Moderado
$-1 < r \leq -0,8$	Fuerte negativo
r = -1	Perfecto negativo

Fuente: Francisco & Dantas Neto (2021) Adaptado

Para el análisis en cuestión, el valor PCI, debido a su metodología de cálculo presente más grande exactitud de la cuantificación real del estado de condición del elemento evaluado (piso), será considerada con variable independiente (X). Las variables dependientes serán por tanto los pozos de visita (Y₁) y los canalones (Y₂).

ayudar en análisis estadística, se realizó la prueba estadística de hipótesis para conocer la diferencia entre las medias obtenido. En este caso, se determinará lo siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (4)$$

$$H_A: \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (5)$$

En que:

H₀: Hipótesis nula;

H_A: Hipótesis alternativa;

μ₁ y μ₂: Promedios de las poblaciones 1 y 2, respectivamente (Siendo la población relacionada

con los pavimentos y la población 2 cada uno de los elementos de drenaje a la vez).

En ese estudio, el caso considerado fue el de datos no apareados, con desviaciones estándar de la población conocido, dando como resultado dos comparaciones de medias. El procedimiento consiste en contrastar las diferencias de medias entre las poblaciones, adoptando el orden de 0,5 con base en el estudio de Medeiros *et al.* (2017). Luego, el análisis verifica la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_d = 0,5 \quad (6)$$

$$H_A: \mu_d > 0,5 \quad (7)$$

En que:

μ_d : Diferencia de medias entre poblaciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estado del suelo

El levantamiento de los defectos encontrados en los pavimentos se muestra en la Tabla 5. Los defectos de fisuración de bloque, elevación y asentamiento, corrugación, fisuración de reflexión de juntas, desnivel del pavimento/pendiente lateral, cruce de ferrocarril, deslizamiento de masa, fisuración por deslizamiento e hinchamiento fueron no encontrados durante la encuesta, por lo que no se cuantifican los defectos antes mencionados en la Tabla 5.

Tabla 5. Cuantificación de Defectos de Pavimento

Tr.	TF	E	AL	TB	TLV	R	AP	P	TR	D
	Superficie [m ²]	Superficie [m ²]	Superficie [m ²]	Metro	Metro	Superficie [m ²]	Superficie [m ²]	Elementos.	Superficie [m ²]	Superficie [m ²]
1	-	-	-	12	143	5	-	-	-	50
2	88	-	-	-	90	dos	-	-	15	200
3	59	-	0.5	42	46		-	1	-	210
4	79	-		38.7	42	11.25	-	-	-	220
5	-	-	-	-	43	4.25	-	-	-	38
6	-	-	-	-	21		-	1	-	26
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
8	-	-	-	-	35	-	-	-	-	13
9	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	46
10	-	-	-	-	-	4.5	-	-	-	61
11	-	-	-	-	-	dos	-	-	-	9
12	-	0.5	-	-	-	-	-	-	-	19
13	-	-	-	-	-	1	6	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36
15	-	-	-	-	49	-	-	-	-	73
16	32	-	-	-	-	-	dos	-	-	54
17	-	-	-	-	6	-	-	-	-	80
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15

Leyenda: TLV: Grieta longitudinal y transversal, TF: Grieta por fatiga, E: Exudación, AL: Hundimiento localizado, TB: Grieta en el borde, R: Parche, AP: Agregado pulido, P: Cucharón, TR: Huella de rueda, D: Desgaste.

A partir de la evaluación del levantamiento de defectos de las secciones, se es posible señalar que el defecto con desgaste fue el mayor registro, apareciendo en casi todas las localidades evaluadas, con excepción de la Sección 13.

Gran parte de las grietas presentadas pueden haber sido causadas por la reflexión de las grietas en la base de los paralelepípedos. Es importante resaltar que no él era posible adquirir la información con el Ayuntamiento sobre qué pavimentos flexibles evaluados tenían o No este tipo de base en paralelo. la observación este factor solo era posible cuando la base era expuesta debido a algunos defectos del piso.

de acuerdo con Bernucci *et al.* (2008), estas grietas también pueden ser causado por demasiado, como la acción de cargas de tráfico repetitivas, la acción del clima (gradientes térmicos), la posible envejecimiento del ligante y pérdida de flexibilidad, compactación ineficiente del revestimiento, deficiencia en el contenido de ligante asfáltico, subdimensionamiento, asentamientos diferenciales, entre otros.

Después de pesar el área afectada según lo determinado por la norma ASTM D6433/2018, fue posible calcular el estado de los pavimentos a partir del PCI. Los valores del índice para cada tramo, así como la respectiva clasificación, se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de la condición de los pavimentos por el método PCI

Tramo	PCI	Clasificación
1	56	Bien
2	20	Muy malo
3	37	Malo
4	50	Promedio
5	81	Muy Malo
6	74	Muy Bien
7	98	Excelente
8	88	Excelente
9	92	Excelente
10	89	Excelente
11	94	Excelente
12	95	Excelente
13	99	Excelente
14	94	Excelente
15	62	Bien
16	64	Bien
17	83	Muy Bien
18	80	Muy Bien
19	85	Muy Bien

4.2 Estado de los Elementos de Drenaje

Se observó la existencia y condiciones de los elementos de drenaje (bocas y cunetas) en los tramos evaluados. La información sobre los elementos se puede encontrar en Cuadro 7. Se constató la ausencia de ambos elementos en los extractos 15 y 17. presencia concomitante de los elementos en la mayoría de los tramos evaluados, con excepción de la sección 4, que no presentaba bocas de lobo en el su extensión, sin embargo contado con presencia de cuneta.

Tabla 7. Cuantificación y Calificación de Elementos de Drenaje

Tramo	Cuantificación de Elementos		Calificación de Elementos					
			Boca de lobo			Canal		
	Boca de lobo	Canal	Bien	Regular	Horrible	Bien	Regular	Horrible
1	3	Sí	X	-	-	-	-	X
2	2	Sí	-	X	-	-	X	-
3	1	Sí	X	-	-	-	X	-
4	0	Sí	-	-	-	-	X	-
5	1	Sí	X	-	-	-	X	-
6	1	Sí	X	-	-	-	X	-
7	2	Sí	-	-	X	-	X	-
8	2	Sí	--	X	-	-	X	-
9	1	Sí	X	-	-	X	-	-
10	1	Sí	X	-	-	X	-	-
11	1	Sí	X	-	-	X	-	-
12	1	Sí	X	-	-	X	-	-
13	1	Sí	-	X	-	X	-	-
14	1	Sí	X	-	-	X	-	-
15	0	No	-	-	-	-	-	-
16	1	Sí	X	-	-	-	X	-
17	0	No	-	-	-	-	-	-
18	1	Sí	-	-	X	-	X	-
19	1	Sí	X	-	-	-	X	-

de acuerdo con la tabla 7, secciones 1, 2, 7 y 8 presentadas más de una boca de acceso a evaluar. En este caso, solo una calificación él era hecho en la columna de calificación del elemento, ya que todas las alcantarillas de un mismo tramo tenían la misma condición, como los tramos 2 y 8, que tenían dos pozos cada uno, y ambas piezas estaban en regular estado.

Él era posible comprobar que la mayoría de las alcantarillas de los tramos, sumando un total de 57.9%, en forma en buen estado.

En cuanto al estado de las canaletas, solo el tramo 1 presentó las condiciones mal. Entonces, incluso si la sección tiene presentó 3 alcantarillas, el estado de la cuneta posiblemente impide el direccionamiento de agua hacia ellos, lo que interfiere con el funcionamiento del sistema. Los demás tramos tenían las canaletas en regular (52,6%) o buenas (31,6%) condiciones.

4.3 Correlación entre la Condición del Pavimento y los Elementos de Drenaje

La Tabla 8 presenta la comparación entre los índices encontrados para la condición de cada elemento evaluado. Para permitir la comparación entre los datos, adaptados de Silva, Diniz y Melo (2020), los valores de PCI se dividieron por 25 (veinticinco) y se convirtieron a la misma escala que la condición de las canaletas y alcantarillas, o, es decir, valores entre 0 y 4.

Tabla 8. Comparación entre índices de condición de los elementos evaluados

Tramo	Valores			Clasificación de condición		
	PCI (Pisos)	bocas de lobo	Canal	PCI (Pisos)	bocas de lobo	Canal
1	2.24	3	1	Bien	Bien	Horrible
2	0.8	2	2	Muy Malo	Regular	Regular
3	1.48	3	2	Malo	Bien	Regular
4	2	0	2	Promedio	no existe	Regular
5	3.24	3	2	Muy Malo	Bien	Regular
6	2.96	3	2	Muy Bien	Bien	Regular
7	3.92	1	2	Excelente	Horrible	Regular
8	3.52	2	2	Excelente	Regular	Regular
9	3.68	3	3	Excelente	Bien	Bien
10	3.56	3	3	Excelente	Bien	Bien
11	3.76	3	3	Excelente	Bien	Bien
12	3.8	3	3	Excelente	Bien	Bien
13	3.96	2	3	Excelente	Regular	Bien
14	3.76	3	3	Excelente	Bien	Bien
15	2.48	0	0	Bien	no existe	No existe
16	2.56	3	2	Bien	Bien	Regular
17	3.32	0	0	Muy Bien	no existe	No existe
18	3.2	1	2	Muy Bien	Horrible	Regular
19	3.4	3	2	Muy Bien	Bien	Regular

De la tabla 5 se observa que en 5 tramos (9, 10, 11, 12 y 14) el estado de todos los elementos evaluados fue máximo, siendo “excelente” para los pavimentos y “bueno” para los desagües pluviales y cunetas. Sin embargo, aunque lo mejor evaluación del piso también se ha conseguido en los tramos 7, 8 y 13, el estado de los elementos de drenaje no alcanzó la misma clasificación, variando entre “regular” y “terrible”.

Es necesario resaltar la situación, presentados por los extractos 15 y 17, que, aun sin ninguno de los elementos de drenaje evaluados en la investigación presentes en las carreteras, el pavimento se presentó en condiciones aceptable para los usuarios, con el segundo mejor clasificación en la escala presentada anteriormente en Tabla 2. Este resultado entra en conflicto en el sentido en que se sugiere que para un buen funcionamiento de las carreteras es necesaria la dirección cantidad adecuada de agua presente en la superficie del pavimento.

La Tabla 9 presenta los valores promedio, desviación patrón y varianza de los resultados encontrados para cada elemento evaluado. la desviación estándar se consideró del tipo de muestreo (n-1).

Tabla 9. Media y Desviación Índices de condición de elemento estándar

Elemento	Promedio (μ)	Desvío Estándar muestra (σ)	diferencia (σ^2)
Pisos (PCI)	3.03	0.89	0.79
bocas de lobo	2.16	1.17	1.37
canalones	2.05	0.91	0.82

Es posible observar que para los tres elementos evaluados (Tabla 9), la desviación estándar fue alto, lo que indica una alta dispersión entre los valores recolectados en el campo.

También él era Se realiza una comparación entre los elementos en base a la diferencia entre los promedios de los resultados de cada evaluación para verificar la hipótesis nula previamente determinada que se presenta en Tabla 10.

Tabla 10. Diferencia de Medias y Análisis de Hipótesis Nula _

Análisis	diferencia de medias (μ_d) _	hipótesis nula (H_0)
Pavimentos x Bocas de Lobo	0.88	rechazate a ti mismo
Pisos x Canaletas	0.98	rechazate a ti mismo

Es posible registrarse (Tabla 10), Rechazo de la hipótesis nula en ambos análisis realizados, ya que se presentó la diferencia entre los elementos evaluados por encima de 0,5. Por lo tanto, los valores encontrados no pueden considerarse aceptable para la correlación entre los elementos.

Todavía para evaluar el nivel de correlación, el análisis se realizó por separado para cada elemento de drenaje combinado con el índice de condición del pavimento, o, es decir, se verificó la correlación entre la condición de los pavimentos y los desagües pluviales, y luego la correlación entre los pavimentos y las cunetas. Los resultados encontrados se presentan en Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de correlación y determinación de Pearson

Combinación	Coeficiente de correlación (R)	Coeficiente de Determinación (r^2)
Pavimentos x Bocas de Lobo	0.14	0.02
Pisos x Canaletas	0.39	0.15

De la Tabla 11, es posible verificar que ambas correlaciones estuvieron dentro del intervalo de $0.1 \leq r \leq 0.5$, siendo por lo tanto considerado como débil y positivo. Sin embargo, es necesario señalar que la comparación con la interpretación de Francisco y Dantas Neto (2021) se considera arbitraria, ya que los valores no tener en cuenta el contexto del estudio.

Aunque los resultados no mostrar un comportamiento claro de Ecuación de tercer grado, en un intento de mejorar el valor de r^2 , una regresión polinomial de grado 3 para ambos análisis. De la Figura 2, es posible observar la dispersión entre la condición de los pavimentos relacionada con la condición de las alcantarillas (Figura 2-A) y cunetas (Figura 2-B), respectivamente.

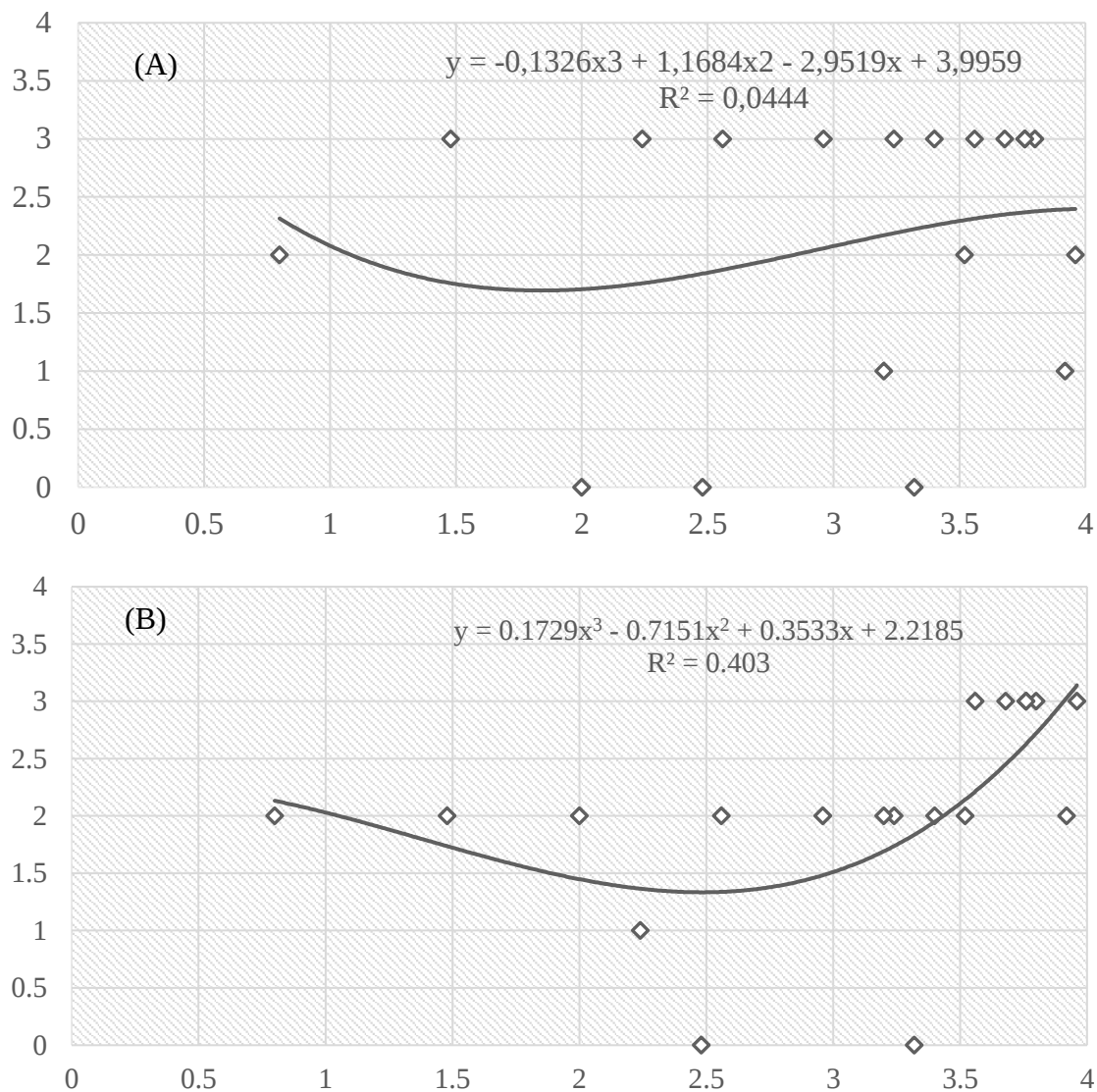


Figura 2. Regresión polinomial: A) Pisos x Canaletas, B) Pisos x Canaletas

Del análisis de los resultados es posible comprobar que por primera verificación (Figura 2-A) se presenta la dispersión de datos con exactitud bajo, en el que el intento de ajuste polinomial de la curva no resultó ser adecuado, con un valor de $r^2 < 0,1$, considerado bajo. En el segundo caso (Figura 2-B), los resultados mostraron mejor exactitud en comparación con el primero análisis. En el caso del ajuste de curvas, el resultado mostró comportamiento medianamente satisfactorio, logrando un $r^2 = 0,4$.

5. CONSIDERACIONES FINALES

A partir del levantamiento bibliográfico, los elementos de drenaje fueron presentados como criterios primordiales para el buen desempeño de los pavimentos, y, aunque la evaluación estadística ha mostrado una débil correlación entre el estado de los pavimentos y los elementos de drenaje evaluados, es necesario resaltar la nivel de complejidad de los elementos viales urbanos, tales como la presencia de otros sistemas de infraestructura (distribución de agua, alcantarillado, energía, gas, etc.), uso, frecuencia de mantenimiento correctivo, existencia de mantenimiento preventivo, entre otros.

En cuanto al estado de la infraestructura analizada, los datos recabados y evaluados presentan un panorama completo de la evaluación de la situación, ya que para cada elemento se encontraron todo tipo de condiciones existentes en los formularios de evaluación, desde sistemas considerados en buen estado hasta aquellos clasificada como la peor condición. Por lo tanto, esta representación holística de los sistemas de infraestructura podría proporcionar combinaciones de situaciones para ejemplificar la necesidad y la importancia de monitorear la condición de los elementos.

La indicación de la severidad, alcance y extensión resultó adecuada al contexto de la obra, sin embargo, para hacerlo aún más coherente con la realidad registrada, se recomienda calcular el estado de los pavimentos por otros métodos, tales como como angustia Índice de Manifestación Nivel Red (DMINL, 2010) y Pavimento Urbano Índice de Estado (UPCI, 2015), además de relevar el estado de otros elementos presentes en la vía que puedan influir en el estado de los pavimentos. Si bien no fue objetivo de la investigación sugerir propuestas de mantenimiento de los elementos evaluados, la clasificación de niveles de severidad junto con la integración de los datos de los elementos, se presentó como un instrumento viable para planificar y señalar prioridades de intervención en la viales, así como evaluaciones de aceptabilidad del estado de funcionalidad y utilidad de los elementos, pudiendo así establecer metas para posibles intervenciones de mantenimiento por parte de los organismos responsables.

6. REFERENCIAS

- ASTM International. (2018), *ASTM D6433-18, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surve*. DOI: <https://doi.org/10.1520/D6433-18>
- Bernucci, L. B., et al. (2008), *“Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.”* 1ºed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2003). *NORMA 006/2003 – PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento*. Rio de Janeiro: DNIT.
- Francisco, M. R. P., Dantas Neto, J. (2021), *A282 Água: uso racional e sustentável*. 113 f.: il. color. Campina Grande: EPTEC.
- Lima, W. A. S., Sousa, J. P., Matos, O. S., Silva, F. G. S., Oliveira, M. M., Pacheco, G. V. (2022), *Sistemas de drenagem: a importância para a infraestrutura do transporte rodoviário brasileiro*. Brazilian Road Transport Infrastructure, v.8, n.3, p. 17813-17831. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-153>
- Medeiros, R. S., Albuquerque, T. P., Moraes, L. M. B., Araújo, L. G. C., Melo, R. A. (2018), *“Avaliação Das Condições De Conservação De Pavimentos, Drenagem E Calçadas Em Vias Da Cidade De João Pessoa.”* 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, p. 1297–1308.
- Mergh, L. S. (2019), *“Análise de Indicadores da Gestão de Produção em Obras Corporativas”*, Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Novaes, M. P., Carvalho, M. B., Silva, D. C., Rodrigues, H. S., Amorim, M. C. C. (2019), *Avaliação das condições de infraestrutura em drenagem pluvial urbana no município de Curaçá-BA*. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 25043-25048. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-178>
- Oliveira, T. S., Anjos, J. S., Ribeiro, S. E., Oliveira, D. M. (2022), *Análise Descritiva e de Correlação dos Indicadores de Desempenho: Custo, Prazo E Ritmo*. Revista de Engenharia e Tecnologia. V. 14, Nº. 1, 2022. ISSN 2176-7270

- Pires, J. C. M., Mendes, A. T. (2021), *Manifestações patológicas em pavimentação asfáltica: estudo de caso na TO-050, no trecho do anel viário em Porto Nacional/TO*. Engineering Sciences, v.9, n.1, p.28-39. <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.001.0004>
- Resplandes, I. S., Toledo, F. R. S., Resplandes, H. D. de A., Santos, W. S., Borges, K., Carvalho, C. M. (2021). *Ausência de sistemas de drenagem urbana nos pavimentos de Santana do Araguaia-PA e seus impactos*. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 7(1), 12111–01. <https://doi.org/10.18540/jcecvl7iss1pp12111-01-09e>
- Silva, A. N. A., Diniz, M. I L., Melo., R. A. (2020). “*Avaliação das condições do pavimento em vias urbanas na cidade de João pessoa/PB: uma comparação entre índices*” in: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Anais do 34º ANPET - Infraestruturas.

Gestión integral de la corrosión. Análisis documental

M. Donadio^{1*}, J. Capacho², L. Santander³

*Autor de Contacto: donadio.michel@fr.sika.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

Recibido: 27/02/2023 | Correcciones recibidas: 17/04/2023 | Aceptado: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

El objetivo de este informe es hacer un análisis documental sobre las diferentes técnicas de mitigación de la corrosión disponibles en la actualidad, como los morteros de reparación, los inhibidores activos y pasivos de la corrosión, los revestimientos protectores y la protección catódica con corriente inducida o galvánica. Estas estructuras, construidas para durar mucho tiempo, están sometidas al envejecimiento por influencias de su entorno, como el agua, el dióxido de carbono atmosférico y otros elementos nocivos como los cloruros y la contaminación. El proceso de deterioro más común en las estructuras de concreto armado es la corrosión y la consiguiente dilatación de la armadura de acero, lo que provoca la fisuración y el desconchado del concreto.

Palabras clave: corrosión; inhibidor de corrosión; protección catódica, ánodo galvánico.

Citar como: Donadio, M., Capacho, J., Santander, L. (2023), “Gestión integral de la corrosión. Análisis documental”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 235 – 253, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

¹ Technical Manager, Sika Services AG, Suiza.

² Business Development Manager LATAM, Sika Mexicana SA de CV, México

³ Product Engineer, Sika Mexicana SA de CV, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor Michel Donadio escribió el artículo. Los autores Luis Santander y Juan Capacho hicieron contribuciones y adaptaciones de forma y contenido.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Total Corrosion Management. Documentary analysis

ABSTRACT

The aim of this report is to provide a documentary analysis of the different corrosion mitigation techniques currently available, such as repair mortars, active and passive corrosion inhibitors, protective coatings and galvanic or induced current cathodic protection. These structures, built to last for a long time, are subject to ageing due to environmental influences such as water, atmospheric carbon dioxide and other harmful elements such as chlorides and pollution. The most common deterioration process in reinforced concrete structures is corrosion and subsequent expansion of the steel reinforcement, leading to cracking and spalling of the concrete.

Keywords: Corrosion; corrosion inhibitor; cathodic protection; galvanic anodes.

Gestão Total da Corrosão. Análise documental

RESUMO

O objetivo deste relatório é apresentar as diferentes técnicas de mitigação da corrosão atualmente disponíveis, tais como argamassas de reparo, inibidores de corrosão (ativos ou passivos), revestimentos de proteção e proteção catódica por corrente induzida ou galvânica. As estruturas, construídas para durar muito tempo, estão sujeitas ao envelhecimento precoce devido a influências ambientais como água, dióxido de carbono atmosférico e outros elementos nocivos, como cloretos e poluição. O processo de deterioração mais comum em estruturas de concreto armado é a corrosão e posterior expansão devida aos produtos de corrosão do aço, levando à fissuração e ao destacamento superficial do concreto.

Palavras-chave: corrosão; inibidor de corrosão; proteção catódica; ânodos galvânicos.

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto armado,—como edificios, puentes, etc., están diseñadas para durar mucho tiempo; no es raro que las estructuras de los puentes tengan una vida útil de 100 años o más. Al tener el recubrimiento de concreto correcto con un diseño de mezcla apropiado, el concreto en sí generalmente proporciona la protección contra la corrosión necesaria para las barras de refuerzo de acero embebidas.

Durante la hidratación, el cemento genera cal hidratada que produce un entorno altamente alcalino en la solución de poro de la matriz de cemento. De este modo, las barras de acero de refuerzo se mantienen en una condición pasivada, ya que se forman óxidos de hierro estables en la superficie del acero.

Sin embargo, debido al proceso natural de carbonatación, el concreto puede perder progresivamente su alta alcalinidad, o debido a la acción localizada de cloruros los óxidos de hierro estables pueden descomponerse, lo que significa que las barras de acero de refuerzo ya no están en un ambiente pasivo, y pueden comenzar a corroerse.

Estos problemas se producen cuando, por ejemplo, el recubrimiento del concreto es inferior al especificado, o durante la construcción ha habido una falta de compactación, o un curado inadecuado del concreto.

La corrosión de las armaduras de acero embebidas en el concreto se comporta de la misma manera que la corrosión de un metal en soluciones electrolíticas, la corrosión se produce siempre en los ánodos como es descrito en la figura 1.

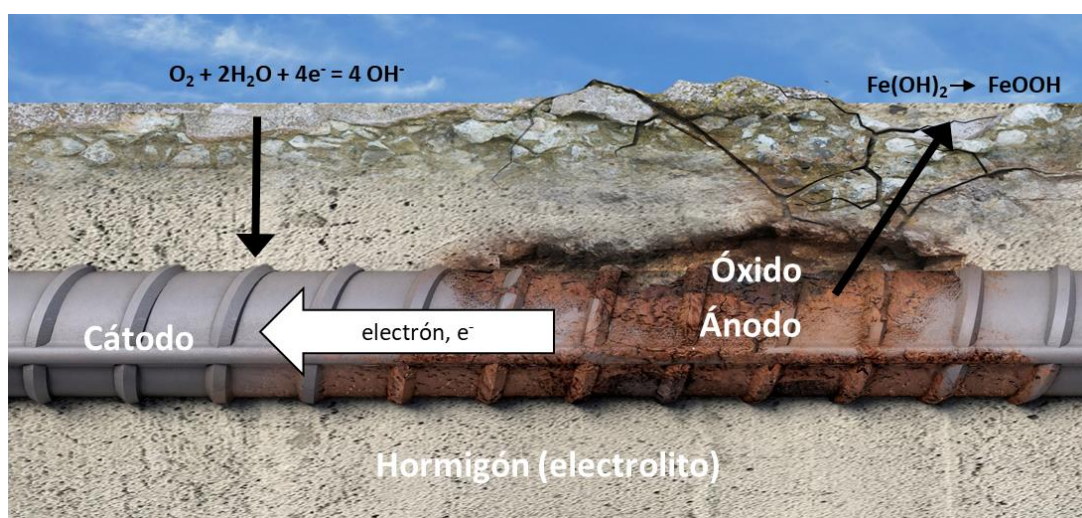


Figura 1. modelo esquemático de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

Las condiciones requeridas para que ocurra la corrosión del acero son:

- Pérdida de pasividad (debida a la carbonatación, o a la presencia de cloruros).
- Humedad en los poros del concreto (electrolito).
- Presencia de oxígeno cerca de las armaduras.

Las tres condiciones deben estar presentes para que el acero se corra.

1.1 Corrosión inducida por carbonatación

Cuando el dióxido de carbono atmosférico se encuentra con la cal hidratada en la solución de poro del concreto no carbonatado, se produce una reacción de carbonatación, y el hidróxido de calcio altamente alcalino ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un $\text{pH} \sim 13$), procedente de la cal hidratada, se convierte en

carbonato de calcio poco alcalino (pH ~9), relativamente insoluble, como se aprecia en la ecuación 1:

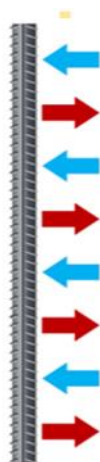


Figura 2. Adaptado de Angst. El ánodo y el cátodo son de tamaño similar en la corrosión inducida por carbonatación.



Figura 3. Corrosión inducida por carbonatación en zonas de escaso o inadecuado recubrimiento de concreto.

La corrosión iniciada por carbonatación genera una serie de microceldas anódicas / catódicas (figura 2), que conducen a lo que puede verse como una corrosión generalizada, pero que progresa con bastante lentitud, normalmente una reducción de 1/100 a 1/10 mm de la armadura por año (Angst et al, 2020). Este tipo de corrosión afecta con frecuencia a grandes áreas de armadura cerca de superficies de concreto expuestas en zonas de escaso o inadecuado recubrimiento de concreto, como el muro de la fachada del edificio que se muestra en la figura 3.

1.2 Corrosión inducida por cloruros

Incluso en condiciones altamente alcalinas del concreto no carbonatado, cuando hay la entrada de iones cloruro, por ejemplo en atmósferas marinas o cuando se aplican sales de deshielo, etc., éstos alcanzan la superficie del refuerzo embebido, hay una generación localizada de ácido, que ataca el acero causando corrosión por picaduras (Silva, 2013), con la formación de áreas anódicas locales, como se muestran en las figuras 4 y 5 a continuación:

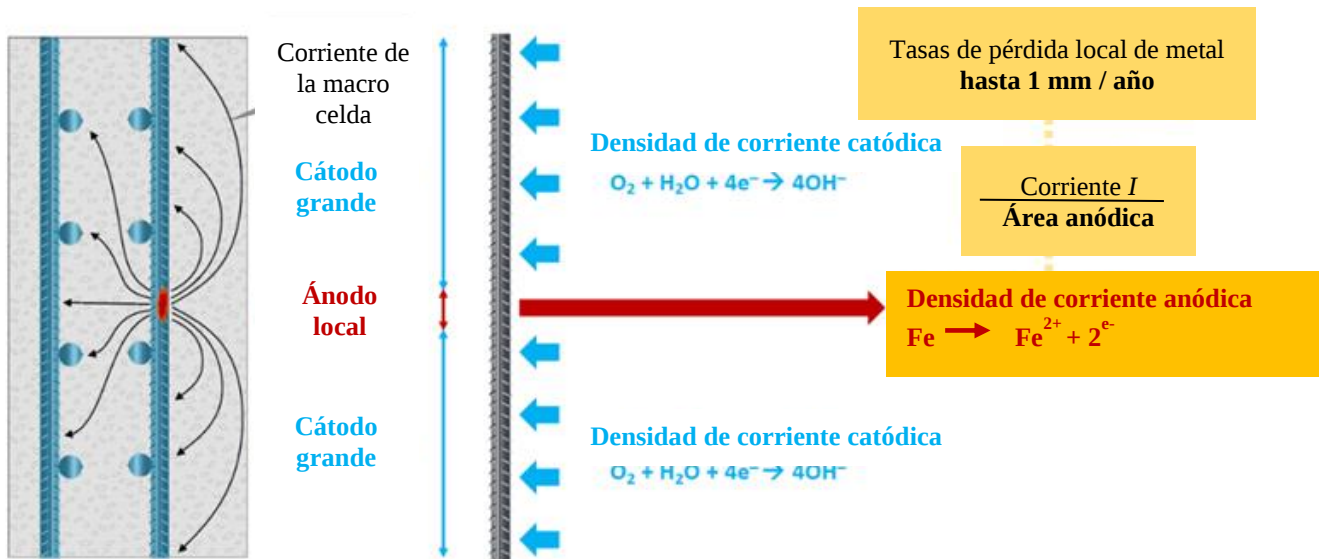


figura 4. Adaptado de Angst. formación de un ánodo localizado en el concreto contaminado con cloruro.



Figura 5. Corrosión típica inducida por picaduras de cloruro.

La velocidad de la corrosión inducida por cloruros puede ser rápida, muy local y puede no producir signos visibles externamente, hasta que el concreto se agrieta y la cubierta se delamina, como se ve en la figura 6. El colapso repentino y devastador de las estructuras debido a esta pérdida local de la sección transversal de la armadura puede ocurrir, sin señales de advertencia previas.

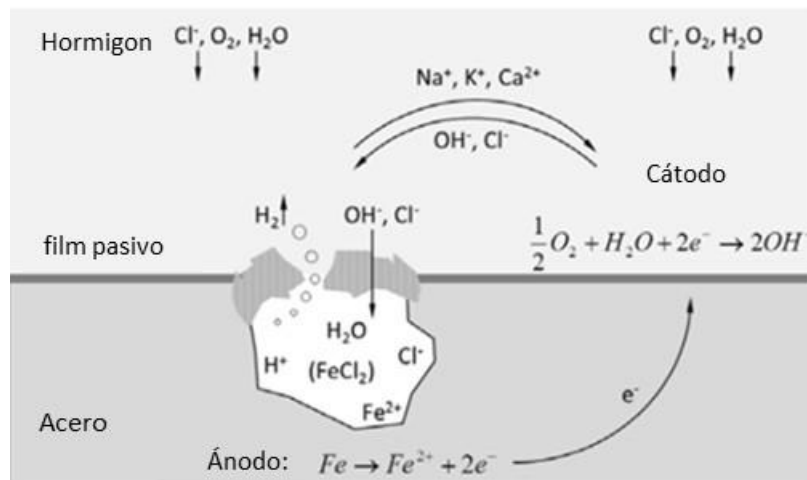


Figura 6. Adaptado de Silva (Silva, 2013). Representación esquemática de la corrosión por picaduras inducida por cloruros.

1.3 Sistemas para la gestión de la corrosión

Existen diferentes tipos de sistemas para la gestión de la corrosión, estos permiten resolver la problemática alrededor de la corrosión en los aceros de refuerzo:

- Morteros de reparación para el concreto
- Inhibidores de corrosión activos y pasivos
- Recubrimientos anti-carbonatación
- Protección catódica contra la corrosión inducida con corriente
- Ánodos galvánicos (empotrados, discretos y aplicados en superficie)

Otros sistemas disponibles son mencionados en las normas de los estándares europeos EN 1504, no obstante, estos no son descritos en este artículo.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis documental sobre unos de los sistemas los más usados para gestión de la corrosión mencionados antes.

2. SISTEMAS PARA LA GESTIÓN DE LA CORROSIÓN

2.1 Morteros de reparación para el concreto

La corrosión de la armadura de acero afecta negativamente a muchas estructuras de concreto. La reparación por parches es una técnica común que implica la eliminación del concreto deteriorado físicamente (por ejemplo, mecánicamente con cinceles o mediante hidrodemolición), la limpieza de las superficies de acero expuestas y, a continuación, la restauración del perfil original con un mortero o morteros de reparación adecuados.

Este proceso deja el acero de la zona de reparación en estado pasivo (Page & Sergi, 2000).

En un número significativo de casos se han observado daños posteriores inducidos por la corrosión en lo que parecía concreto sano en el área inmediata alrededor de las reparaciones de parches, como se ve en la figura 7. En ocasiones, esto ha ocurrido pocos meses después de la finalización del proceso de reparación con parches (Qian, et al 2006). Este fenómeno se conoce como formación de ánodos incipientes o en anillo, o efecto halo (Bertolini, et al 2004).

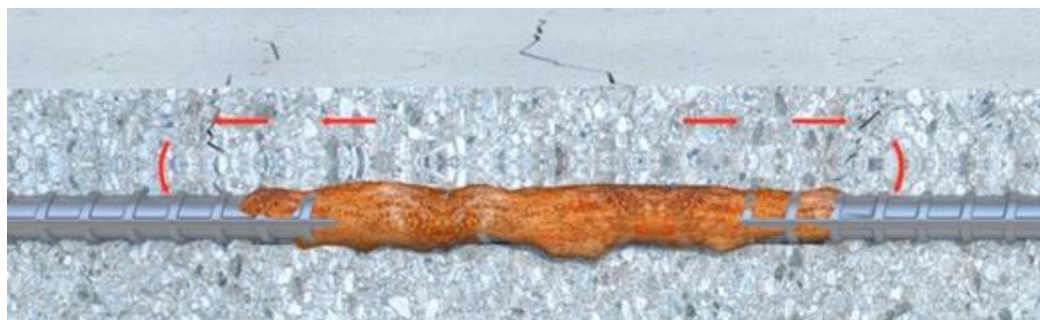


Figura 7. Desconchamiento debido a la corrosión por cloruros.

El concepto de que la actividad macro celular (la formación de ánodos y cátodos separados espacialmente) causa el efecto de ánodo incipiente fue introducido por primera vez por Page y Treadaway (Page & Treadaway, 1982). Sugirieron que la redistribución de los sitios anódicos y catódicos tras la reparación del concreto afecta al riesgo futuro de corrosión. Christodoulou (Christodoulou, 2012) sostiene la opinión generalizada de que la causa de los ánodos incipientes es la pérdida de la protección catódica natural que proporciona el acero en corrosión al acero del concreto base adyacente al parche de reparación.

El proyecto Conrep (Tilly et al, 2007) indica que, en Europa el 20% de los trabajos de reparación fallan en 5 años y el 55% en 10 años. El documento también indica que sólo el 30% de las reparaciones de parches tuvieron éxito cuando se utilizaron de forma aislada, mientras que este

porcentaje aumentó al 50% cuando se combinaron con un revestimiento protector de la superficie. Por tanto, podemos resumir el proceso de ánodo incipiente del siguiente modo:

- El desconchamiento debido a la corrosión inducida por el cloruro del acero de refuerzo se produce en las zonas anódicas.
- La extracción del concreto se realiza en estas zonas afectadas.
- La reparación se lleva a cabo con un material de reparación a base de cemento patentado que es altamente alcalino.
- La zona recién reparada pasa a ser una zona catódica (debido a la alta alcalinidad del mortero de reparación).
- Las zonas catódicas que rodeaban a las zonas anódicas (zonas desconchadas) se convierten ahora en zonas anódicas, ya que son menos alcalinas que el mortero de reparación recién aplicado y lo más probable es que ya contengan algunos cloruros.
- El acero de refuerzo que antes se encontraba en las zonas catódicas protegidas ya no se encuentra en un entorno de pasivación, ya que esta zona se ha convertido en un ánodo.
- La aceleración de la corrosión se produce entonces en estas zonas anódicas recién formadas (que rodean las zonas de reparación del parche); consulte las figuras 7 y 8.

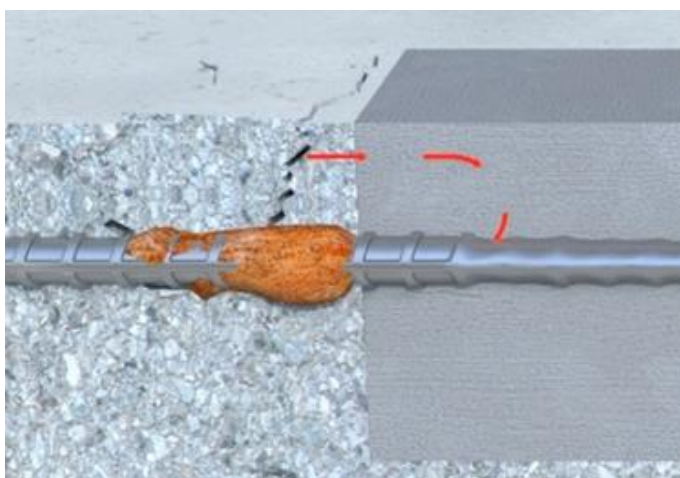


Figura 8. Desconchamiento en el área adyacente debido a la corrosión por ánodo incipiente.

Por lo tanto, especialmente en caso de corrosión de la armadura inducida por cloruros, la reparación del concreto con morteros de reparación de parches por sí sola, podría no proporcionar la eficacia deseada a largo plazo de la reparación.

En consecuencia, los trabajos de reparación de parches deben combinarse con sistemas adecuados para evitar la formación de ánodos incipientes.

2.2 Inhibidores de corrosión

Un inhibidor es una sustancia que retrasa o retarda la velocidad de una reacción química. Un inhibidor de corrosión se define como una sustancia que retrasa el inicio de la corrosión o reduce la velocidad de corrosión del acero existente.

Los inhibidores de la corrosión para concreto armado están disponibles como aditivos que pueden mezclarse con el concreto, el mortero de reparación o el concreto de reemplazo, o como productos de impregnación aplicados a la superficie; este último es el tipo más comúnmente utilizado para los trabajos de reparación del concreto.

Existen dos tipos principales de inhibidores de corrosión en el mercado:

- Inhibidores activos que requieren que el componente activo penetre y alcance las barras de refuerzo para poder proporcionar una película continua en la superficie, que proteja las

barras de acero de la corrosión.

- Inhibidores pasivos que actúan de forma diferente, que es impidiendo que el agua líquida penetre y migre a través del concreto, permitiendo al mismo tiempo la evaporación de la humedad atrapada por difusión de vapor. Esto aumenta la resistividad del concreto que rodea el acero de refuerzo. Una ventaja de esta técnica es que también evita la futura entrada de cloruros en la estructura.

2.2.1 *Inhibidores activos de la corrosión*

También existen en el mercado diferentes tecnologías de inhibidores activos de la corrosión:

- Inhibidores de la corrosión anódica que suprimen la reacción anódica - el producto típico es el inhibidor a base de nitrito. Su uso puede ser crítico si su concentración no es lo suficientemente alta, ya puede producirse una corrosión acelerada.
- Inhibidores de la corrosión catódica que ralentizan la propia reacción catódica o precipitan selectivamente en las zonas catódicas para aumentar la impedancia de la superficie y limitan la difusión de especies reducibles a estas zonas. Los productos típicos son el compuesto de zinc (precipitación de óxido que forma una película protectora sobre la barra de refuerzo) o el sulfito de sodio que actúa como secuestrador de oxígeno. Se consideran seguros, pero son menos eficaces que los inhibidores anódicos.
- Inhibidores de corrosión ambiódicos (mixtos) que actúan simultáneamente en las zonas anódica y catódica. Esta clase de inhibidores tiene un efecto sinérgico, combinando los beneficios de los tipos anódico y catódico, incluso a dosis bajas. Son seguros a dosis bajas, no se ha encontrado ninguna aceleración de la corrosión, sólo un efecto reductor.

Los inhibidores ambiódicos suelen basarse en una mezcla de un aminoalcohol y su sal de aminoácido. Estas moléculas son muy pequeñas y muy volátiles, y no reaccionan con el cemento, por lo que pueden migrar libremente dentro de la matriz de cemento (Tritthart, 2002).

En resumen, los inhibidores de corrosión ambiódicos:

- Penetran en el concreto tanto en fase líquida como de vapor
- Desplazan hidróxidos en la superficie del acero en concreto carbonatado
- Desplazan cloruros en la superficie del acero (en determinadas condiciones)
- Forman una capa química adsorbida de 100-1000 angstrom de espesor en la superficie de la armadura de acero.
- Reducen la disolución de hierro en el ánodo
- Reducen el acceso de oxígeno en el cátodo

Sin embargo, en muchos países, la tecnología de los inhibidores activos de la corrosión aplicados en superficie sólo ha tenido una aceptación limitada y, de hecho, pueden presentarse limitaciones significativas en cuanto a su uso y eficacia:

- La primera limitación es su capacidad de migrar en cantidad suficiente para ser eficaz. Si el concreto es de alta calidad y/o la cubierta es relativamente importante, entonces la capacidad de la molécula inhibidora para migrar a profundidad en cantidad suficiente al nivel de las barras de refuerzo es limitada. Esta situación es la más probable en las estructuras de ingeniería civil.
- La segunda limitación importante se produce cuando ya hay cloruros presentes en el concreto. De acuerdo con la experiencia y tras intensas investigaciones como las del proyecto SAMARIS (SAMARIS, 2003-2005), estos inhibidores no son eficaces si ya existe un cierto nivel de cloruros cerca de las barras de refuerzo.

En resumen, para las estructuras marinas o de ingeniería civil expuestas a sales de deshielo, los inhibidores activos de la corrosión no son la solución óptima para mitigar la corrosión existente.

Sin embargo, existen algunos resultados positivos para el uso de estos inhibidores en la corrosión

inducida por cloruros - el proyecto SAMARIS también presenta uno de ellos - Fleet Flood Bridge, donde el inhibidor se utilizó con éxito para abordar el problema de la corrosión incipiente del ánodo.

Como muestran Heiyantuduwa (Heiyantuduwa, 2006) y Taché (Taché, 2000) (véase la figura 9 donde se nota una reducción fuerte de la corrosión con el efecto de los inhibidores que son aplicados antes o después de la carbonatación acelerada), esta tecnología funciona mejor en concreto armado con corrosión del acero inducida por carbonatación por tres razones principales:

- La corrosión inducida por la carbonatación suele estar asociada a un bajo recubrimiento del concreto. Por lo tanto, es más fácil que el inhibidor llegue a la armadura.
- La carbonatación se produce principalmente en concretos de menor calidad, por lo que su densidad es menor y, en consecuencia, hay una mejor penetración (profundidad y cantidad) del inhibidor.
- La velocidad de corrosión asociada a la carbonatación es relativamente lenta, por lo que es más fácil que el inhibidor sea eficaz.

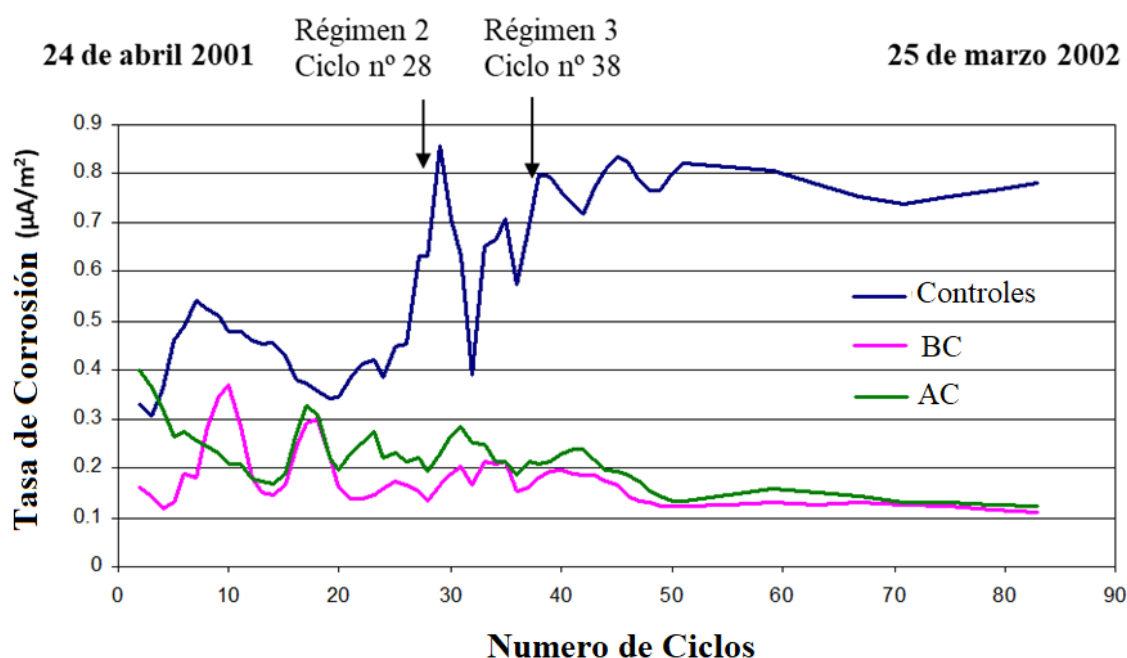


Figura 9. Concreto carbonatado – efecto del inhibidor activo (aplicado antes y después de la carbonatación). (Heiyantuduwa, 2006)

Cuando resulta adecuada, la tecnología de inhibidores activos de la corrosión es una técnica muy económica.

Normalmente, los inhibidores activos de la corrosión son más eficaces para reducir la corrosión inducida por la carbonatación en los edificios que para mitigar la corrosión inducida por el cloruro en la ingeniería civil o las estructuras marinas.

2.2.2 Inhibidores pasivos de la corrosión

Como se ha indicado anteriormente, los inhibidores pasivos de la corrosión actúan aumentando significativamente la resistividad del concreto a nivel de las barras de refuerzo. Los inhibidores pasivos de tipo silano concentrado con un contenido activo en torno al 80% para los tipos en crema, o superior al 95% para los tipos líquidos, son soluciones eficaces para reducir la penetración del agua en estructuras de concreto densas. Numerosos estudios de campo atestiguan también su larga duración. Christodoulou (Christodoulou, et al 2012) ha demostrado que "los tratamientos realizados hace 20 años pueden seguir proporcionando un efecto protector residual".

Estos inhibidores pasivos de la corrosión son muy eficaces para evitar la migración de cloruros en el concreto. Eva Rodum (Rodum, 2012) ha realizado pruebas en estructuras existentes y ha demostrado que las impregnaciones hidrófobas de diferente forma son muy eficaces para evitar la migración de cloruros, incluso 10 años después de su aplicación (véase la figura 10) donde el concreto de referencia tiene un contenido de cloruros muy elevado mientras que los hormigones tratados con los diferentes tratamientos hidrofóbicos tienen niveles de cloruros cercanos a cero. Los estudios realizados por M. Brem (Brem, et al 2022) durante un periodo de 11 años muestran que la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto están muy bien correlacionadas, lo que confirma que la reacción de corrosión está controlada principalmente por el contenido de humedad del concreto a nivel de la armadura de acero. En este estudio, un silano en crema fue aplicado en el concreto dejando una parte sin aplicación como referencia. Se han instalado sistema de monitoreo que permiten medir la resistividad a diferente profundidad en el concreto y la actividad de corrosión de las armaduras. Después de 11 años, no hay penetración de humedad en la zona tratada (en azul in la figura 11) con una actividad de corrosión casi nula. Del otro lado, se nota una actividad de corrosión alta y grande humedad en la zona no tratada (en negra en la figura 11). Este estudio también muestra la ventaja positiva de este tratamiento con silano en términos de longevidad y protección contra la corrosión.

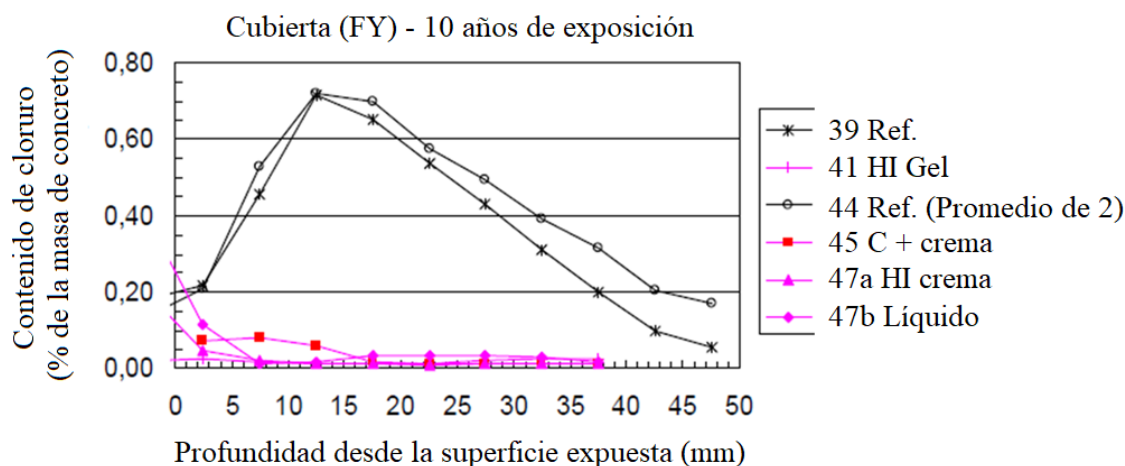


Figura 10. Perfiles de cloruro del concreto de la parte inferior de un muelle en Noruega. (Rodum, 2012)

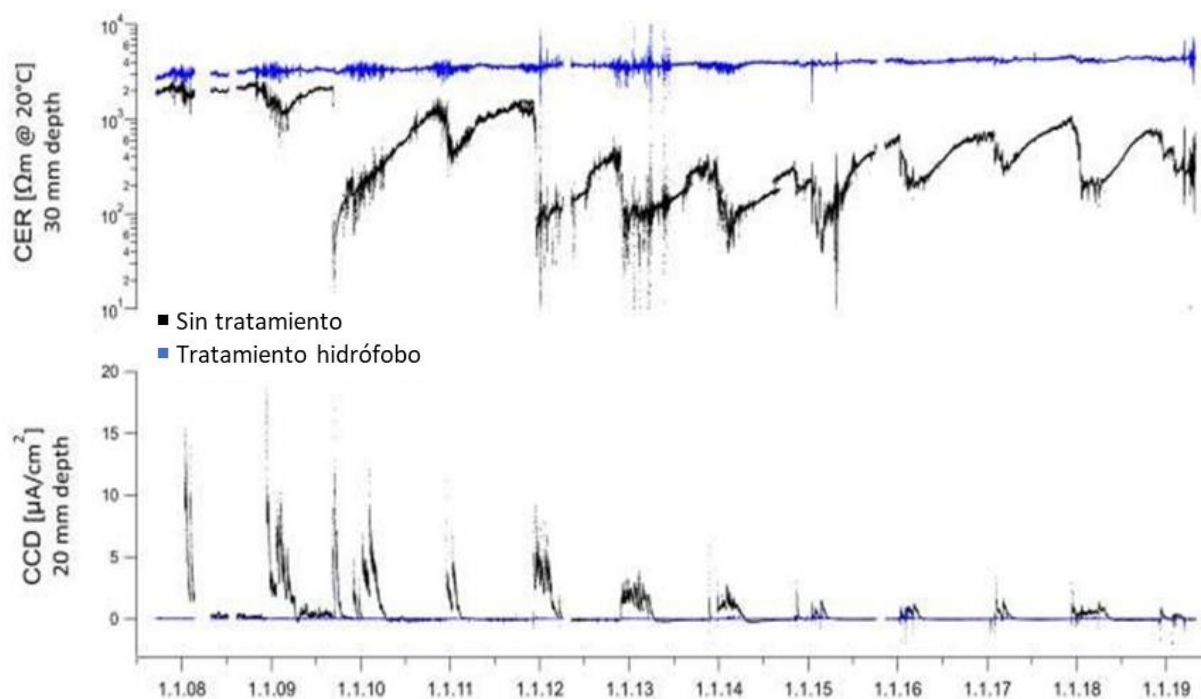


Figura 11. Resistividad eléctrica del concreto CER (arriba) y densidad de corriente de corrosión CCD (abajo) de superficies no tratadas (negro) y tratadas (azul) con una impregnación hidrófoba de crema del techo de un túnel durante un periodo de 11 años (Brem, et al 2022).

En resumen, los inhibidores pasivos de la corrosión son muy eficaces para prevenir a largo plazo la corrosión inducida por cloruros.

Sus capacidades para mitigar la corrosión existente son más discutibles y sus eficacias pueden depender del nivel de corrosión y de sus capacidades para penetrar lo suficiente en la superficie del concreto (sin requerimiento de alcanzar las barras de armadura). Además, el concreto debe seguir permitiendo la difusión de vapor en cada dirección para que la humedad se evapore y el concreto se seque al nivel de la armadura.

2.3 Revestimientos de protección

La función principal de los revestimientos de protección de las superficies de concreto es generalmente de controlar el avance del frente de carbonatación en la matriz de cemento.

Estos revestimientos también pueden formularse para ser elásticos y puentear eficazmente las grietas, incluso a temperaturas muy bajas (hasta -20°C o menos).

Dependiendo del producto, la preparación de la superficie y la aplicación puede observarse una durabilidad típica de 10-15 años para un revestimiento flexible de base acrílica y dispersión en agua, o de 15-20 años para un revestimiento rígido de base de resina metacrilato y dispersión en disolvente (Mozaryn, et al 2009). Transcurrido este tiempo, puede ser necesaria una capa de repintado para mantener el rendimiento protector. Sin embargo, hay ejemplos en los que se ha observado un fallo prematuro, debido principalmente a que la corrosión estaba demasiado avanzada, a un contenido excesivo de humedad o a una preparación y aplicación inadecuadas de la superficie.

Una vez realizadas las reparaciones del concreto, pueden utilizarse revestimientos protectores para impedir la futura entrada de elementos nocivos (por ejemplo, cloruros y CO₂), y para proporcionar un aspecto visual homogéneo del sustrato ocultando las diferencias de color debidas a los trabajos de reparación del parche.

Los revestimientos de protección transpirables mitigan la corrosión del mismo modo que las impregnaciones hidrófobas, impidiendo la entrada de agentes nocivos (por ejemplo, cloruros y CO_2) y permitiendo que el concreto se seque.

Pero si la corrosión está demasiado avanzada y/o si se utilizan revestimientos no transpirables, existe el riesgo de que la humedad quede atrapada con todos los ingredientes presentes en el concreto para que la corrosión continúe.

2.4 Protección catódica

Existe una norma europea actualizada de reciente elaboración que es de aplicación: Protección catódica del acero en concreto (ISO 12696:2016). Esta norma es válida tanto para la protección catódica por corriente inducida como para la protección galvánica.

2.4.1 Protección catódica por corriente inducida

La protección contra la corrosión se consigue colocando un ánodo, por ejemplo, de malla de titanio, en la superficie del concreto y conectado directamente a la red de armaduras (consulte la figura 12).

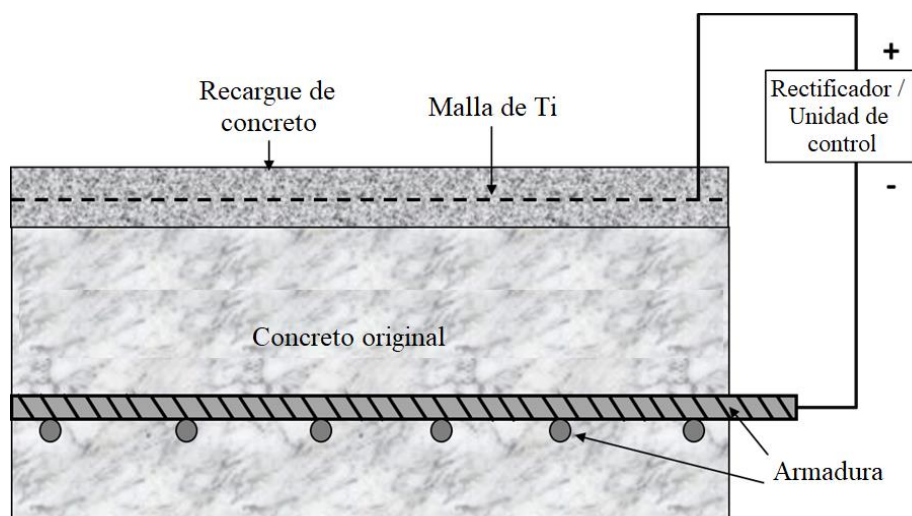


Figura 12. Protección catódica por corriente inducida.

A través de este sistema circula una corriente que mantiene las armaduras en la zona catódica, lo que significa que no puede producirse corrosión en esta zona, incluso en presencia de altos contenidos de cloruro.

Cuando se instala correctamente, es el único sistema disponible que detiene por completo las actividades de corrosión. Sin embargo, el diseño y la instalación de estos sistemas requieren un alto nivel de calificación. También requiere un suministro continuo de corriente eléctrica y un control continuo durante toda la vida útil para garantizar que el sistema funcione correctamente. La falta de este servicio puede acabar provocando efectos destructivos de la corriente inducida en la estructura.

El Programa Nacional de Investigación Cooperativa en Autopistas de EE.UU., en su síntesis 398 (National Cooperative Highway Research Program, 2009), sugiere que muchas agencias no llevan a cabo ni la supervisión ni el mantenimiento, o lo hacen de forma insuficiente, y que ésta es la razón más importante del deficiente rendimiento de muchos de estos sistemas.

En resumen, la protección catódica por corriente inducida es un sistema muy eficaz para detener las actividades de corrosión, pero es muy complejo de diseñar e instalar, además de muy costoso de instalar, suministrar continuamente y supervisar durante toda su vida útil.

Además, esta técnica sólo puede utilizarse en estructuras de concreto pretensado con medidas adicionales como precaución debido al riesgo de fragilización por hidrógeno.

2.4.2 Protección galvánica

La protección galvánica contra la corrosión del acero en el concreto se basa en la formación de un elemento galvánico si un metal menos noble que el acero (figura 13), en contacto directo con el recubrimiento de concreto, se conecta eléctricamente a las barras de acero de refuerzo. El acero de refuerzo queda protegido de la corrosión mientras fluya suficiente corriente galvánica entre el elemento galvánico (que actúa como ánodo) y la armadura de acero (que actúa como cátodo). Lo más habitual es utilizar zinc como elemento de sacrificio/material anódico. La célula galvánica que se forma corresponde a una pila convencional de zinc/aire. La primera aplicación conocida de un sistema galvánico de protección contra la corrosión para el concreto armado fue en el tablero de un puente en Illinois en 1977.

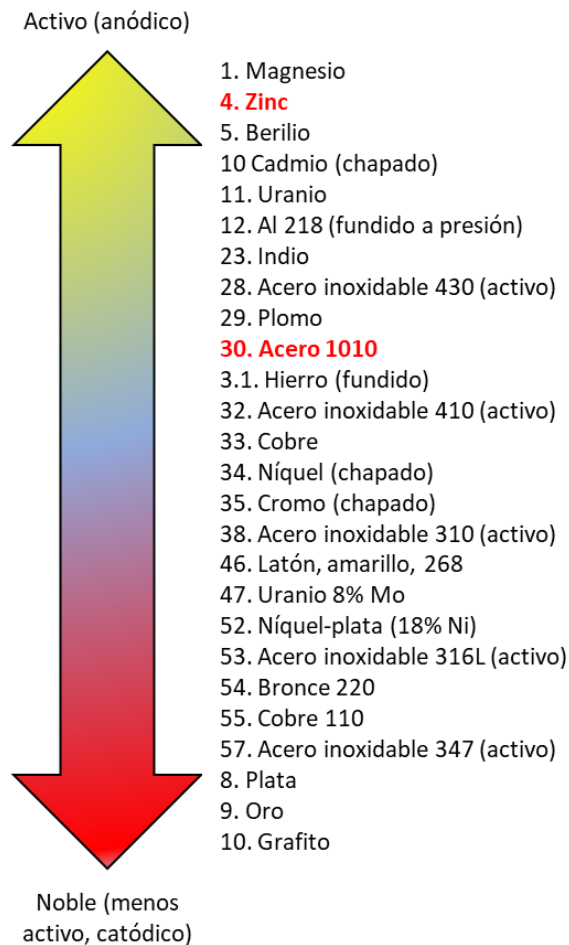


Figura 13. Diferencia de potencial de varios metales.

La eficacia de la protección galvánica contra la corrosión depende de la actividad permanente y de la durabilidad del ánodo de zinc. Sin embargo, la pasivación del ánodo de zinc mediante la formación de una capa pasiva que reduce el flujo de corriente en la superficie del zinc puede deberse a:

- Deposición de productos anódicos (corrosión del zinc) en la superficie del elemento de zinc.
- Contacto con hidróxido de calcio alcalino en la solución de los poros del concreto.

Los primeros sistemas galvánicos aplicados en estructuras de concreto armado sufrían una rápida

pasivación de los ánodos de zinc, por lo que perdían su efecto protector al cabo de poco tiempo. Esta pasivación tenía que solucionarse mediante la introducción de agentes de activación adecuados, que también podían provocar una auto-corrosión excesiva, consumiendo hasta el 70% del zinc sin producir la corriente protectora necesaria.

Los estudios críticos sobre los resultados desiguales de las primeras aplicaciones crearon resistencia al uso de sistemas galvánicos, esta ha continuado hasta ahora en algunos países. Se han realizado enormes esfuerzos de investigación y desarrollo para desarrollar mejores ánodos galvánicos con una activación equilibrada para una eficacia duradera. Todos los métodos que se han desarrollado con éxito hasta la fecha están ampliamente protegidos por patentes. Sin embargo, ahora también hay pruebas de una vida útil del sistema patentado de más de 20 años.

Existen varios sistemas de protección galvánica:

- Mitigación de ánodos incipientes:
 - Ánodos embebidos en la zona reparada con parches
 - Ánodos discretos instalados en la periferia de la zona reparada con parches
- Control de la corrosión en concreto sano pero contaminado:
 - Ánodos discretos híbridos
 - Ánodos discretos galvánicos
 - Ánodos instalados en superficie

Las ventajas típicas de los sistemas galvánicos sobre la protección catódica por corriente impresa son:

- Sin necesidad de cableado externo de los ánodos (sin riesgo de robos de cable de cobre)
- Instalación sencilla, coste relativamente bajo
- Sin riesgo de fragilización por hidrógeno en tendones pretensados o postensados
- Densidad de corriente autoajutable
- No requiere mantenimiento ni supervisión continuos (aunque siempre se recomienda la supervisión cuando se requiera una vida útil superior a 15 años).

2.4.2.1. Mitigación de los ánodos incipientes

Estos ánodos se colocan y embeben en la zona de reparación del parche (figura 14), y necesitan usar un mortero con una resistividad específica para rellenar el parche (Lozinguéz, et al 2018; Christodoulou, et al 2014), o dentro del concreto que rodea la zona de reparación del parche (Figura 15). La eficiencia de esos ánodos no depende de la resistividad del mortero que se usa para rellenar el parche (Lozinguéz, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) para resolver el problema de la corrosión incipiente de los ánodos.

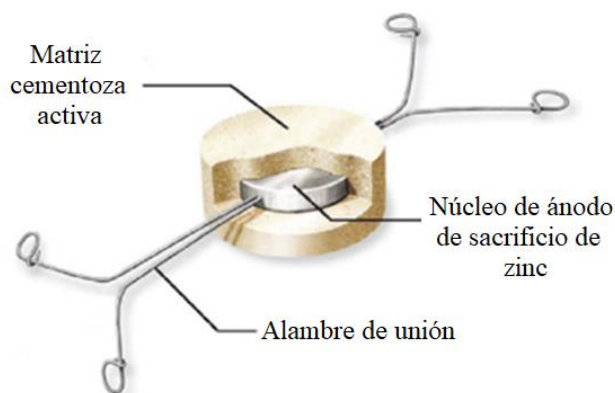


Figura 14. Corte de un ánodo a colocar en un parche de mortero de reparación.



Figura 15. Ánodos a colocar en el área adyacente de un parche de reparación.

La tecnología de los ánodos galvánicos para la protección anticorrosiva del concreto armado está disponible desde hace más de 20 años.

Sergi George (George et al, 2010) ha demostrado, a partir de varios experimentos de campo, la durabilidad a largo plazo de estos ánodos, y una buena correlación entre su vida útil estimada (a partir del consumo del ánodo) y la medición real del zinc residual que queda en el disco al cabo de 10 años.

Los ánodos colocados en las zonas de parches de reparación requieren el uso de un mortero de reparación de baja resistencia, lo que desgraciadamente también limita el nivel de calidad del mortero.

Cuando los ánodos se colocan en el concreto original fuera de los parches de reparación, es decir, fuera pero en sus proximidades, los trabajos de reparación pueden llevarse a cabo utilizando mortero de alta calidad, ya que no hay limitación en la resistividad del mortero. En Cancún, México, se realizó una prueba de campo, instalando ánodos dentro del concreto huésped para proteger el acero de refuerzo contra el efecto incipiente de la corrosión por ánodos. Las mediciones in situ mostraron el nivel de protección de los ánodos instalados (figura 16).



Figura 16. Instalación de ánodos dentro del concreto huésped con verificación de la instalación en Cancún, México.

Algunos trabajos independientes (Loziquez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) han demostrado la importancia de colocar los ánodos en el concreto original de alrededor y no en las zonas de los parches.

Se trata de un sistema relativamente sencillo pero eficaz para evitar el desarrollo de ánodos incipientes, incluso en presencia de altos contenidos de cloruro en concreto sano de buena calidad. Si los ánodos son instalados adentro del parche, el mortero de reparación para llenar el parche debe tener una resistividad específica. Al contrario, si se usan los ánodos que se colocan alrededor del parche, se puede usar un mortero de alta calidad.

2.4.2.2. Prevención de la corrosión con ánodos discretos

Estos ánodos se colocan en concreto sano pero contaminado y luego se unen entre ellos para producir la corriente galvánica como puede verse en la foto de la figura 17, donde se aprecia la preparación para instalar estos ánodos y unirlos entre ellos.

Se han planteado algunas interrogantes (Holmes et al, 2011) sobre la eficacia de este sistema, especialmente en estructuras de concreto con una fuerte corrosión existente. Se ha observado que, cuando funciona exclusivamente en modo galvánico, en presencia de cloruros elevados, la salida de corriente de los ánodos es la misma que la de los ánodos colocados en concreto sin cloruros. Esto significa que la eficiencia de los ánodos discretos puede ser limitada si se utilizan para detener la corrosión en zonas de alta corrosión inducida por cloruros.



Figura 17. Ánodos discretos en el pretil de un puente.

El uso de ánodo galvánica es un sistema sencillo, pero con unas limitaciones en zonas de alta corrosión inducida por cloruros pues el nivel de la corriente galvánica que liberan los ánodos puede ser no suficiente para extraer los cloruros y por consecuencia repasivar el acero.

2.4.2.3. Prevención de la corrosión con sistemas híbridos

Hace más de 15 años, una empresa con sede en el Reino Unido patentó y lanzó al mercado un sistema híbrido que combina la corriente inducida y la protección galvánica.

Durante la fase de corriente inducida (que suele utilizarse inicialmente durante 1 o 2 semanas, en función de la tensión utilizada), la armadura de acero se vuelve a pasivar mediante la formación de iones de hidróxido debido a la salida de corriente inducida, mientras que los cloruros se eliminan del líquido poroso circundante. Una vez que el acero vuelve a estar pasivado, se desconecta la corriente y se conectan los ánodos para que el sistema funcione en modo galvánico puro.

En el estudio mencionado previamente, Holmes (Holmes et al, 2011), figura 18 comparó la actividad de un ánodo de zinc en concreto que contenía un 2,5% de cloruro, funcionando al 100% en modo galvánico, con el mismo ánodo que previamente había sido activado durante una semana por una corriente externa. Estos dos sistemas se compararon con la actividad del mismo ánodo galvánico colocado en concreto sin cloruros. El estudio muestra que el ánodo que funciona en modo galvánico puro genera tanta corriente como el ánodo colocado en concreto sin cloruros, lo que demuestra su ineficacia para proteger el acero. Mientras que el ánodo que ha sido previamente activado es muy activo, debido a la presencia de estos cloruros. Se sacrifica en lugar del acero circundante (véase la figura 19).

Si así lo requiere el consultor, pueden instalarse sistemas de monitorización similares a los instalados en el sistema de protección catódica por corriente inducida, usando un electrodo de referencia y realizar el seguimiento según las recomendaciones de la norma EN ISO 12696.

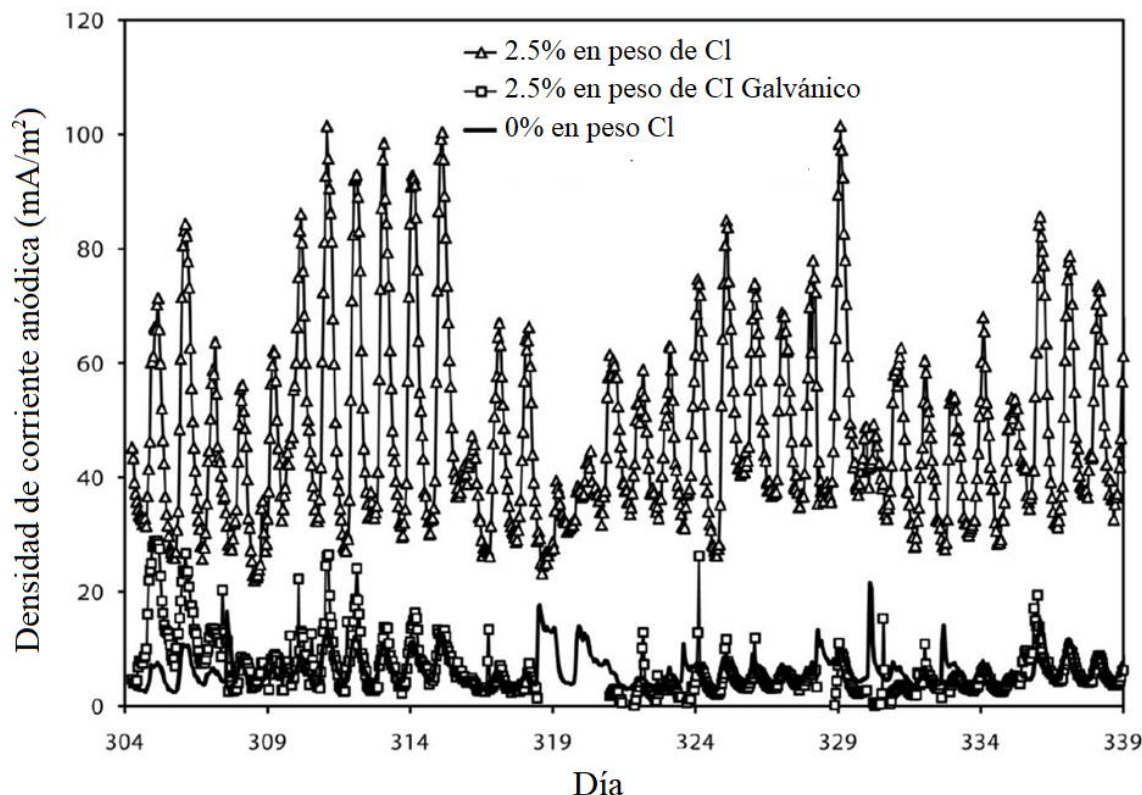


Figura 18. Comparación entre el ánodo (2,5% Cl. galvánico) funcionando en modo galvánico puro y el ánodo (2,5% Cl.) siendo activado por la corriente inducida durante un corto periodo de tiempo antes de funcionar en modo galvánico (Holmes et al, 2011).

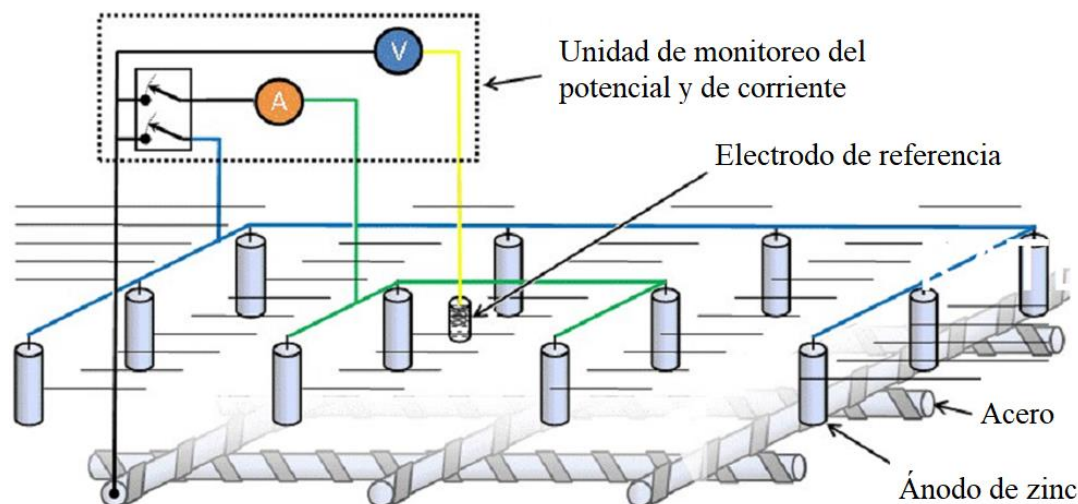


Figura 19. Descripción esquemática del sistema de monitoreo mediante electrodo de referencia

Instalado en el puente de Whiteadder, Escocia (Reino Unido), este sistema híbrido sigue respondiendo al entorno mucho tiempo después de su instalación (Dodds, 2018).

El sistema híbrido es muy atractivo, tal cual se ilustra en la figura 20, ya que proporciona un cierto nivel de garantía de funcionamiento, como las que ofrece el sistema de protección catódica por corriente inducida, al ser menos complejo y no requerir los mismos niveles de mantenimiento a largo plazo con el ajuste constante de la entrada de corriente, como se requiere en el PCCI.

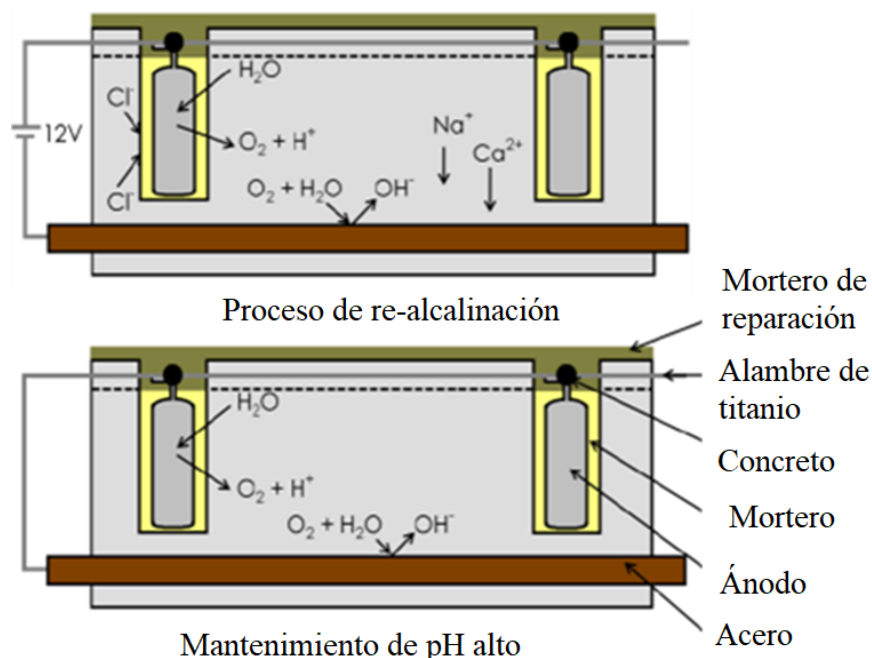


Figura 20. Sistema híbrido que funciona en dos etapas.

Además, también se puede utilizar en estructuras pretensadas, ya que la alta salida de corriente sólo se proporciona inicialmente durante un período muy limitado, que no es suficiente para promover la fragilización por hidrógeno (Dodds, 2018).

3. CONCLUSIÓN

En función de los requerimientos de la estructura, su exposición, los niveles de corrosión existentes, la extensión de la vida útil adicional necesaria y, por supuesto, el presupuesto, existen diferentes técnicas de mitigación de la corrosión disponibles en el mercado.

Para proteger las estructuras contra la corrosión inducida por la carbonatación, los sistemas de protección activos a base de inhibidores de la corrosión, utilizados solos o combinados con un revestimiento protector que permita respirar al sustrato, pero impida la penetración de agua líquida, son sistemas sencillos de instalar, pero eficaces y con un coste razonable en relación con el aumento de la durabilidad que proporcionan.

Para proteger las estructuras contra la corrosión inducida por cloruros, si la corrosión no está muy avanzada y el sustrato tiene la posibilidad de secarse, el uso de inhibidores pasivos de la corrosión es una solución eficaz y duradera.

Para evitar purgar grandes cantidades de concreto sano pero contaminado y, al mismo tiempo, prevenir los efectos indeseables del efecto halo, el uso de ánodos galvánicos colocados en el concreto fuera de la zona a reparar es una posible solución.

Para la prevención y el control de la corrosión en concreto sano pero contaminado (especialmente contaminado con cloruros), la protección catódica es la solución más eficaz.

La solución con el sistema híbrido que combina corriente inducida y corriente galvánica es un buen compromiso entre la necesidad de supervisión permanente de los sistemas de protección por corriente inducida y la sencillez de los sistemas galvánicos.

Se requiere una estrecha colaboración con todos los participantes en el proyecto de renovación para garantizar la selección de la técnica y los sistemas de mitigación más adecuados, así como su instalación y supervisión en caso necesario.

4. REFERENCIAS

- Angst, U.; Moro, F.; Geiker, M.; Kessler, S.; Beushausen, H.; Andrade, C.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Imamoto, K.-ichi; von Greve-Dierfeld, S.; Serdar, M. (2020), *Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a practical review by RILEM TC 281-CC*. RILEM Technical Letters, Vol. 5, 85-100, DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, Elena., Polder, R. B. (2004), *Corrosion of steel in concrete, prevention, diagnosis, repair*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, DOI: <https://doi.org/10.1002/3527603379>
- Brem, M., Lohner, J., Büchler, M. (2022), A long-term study on the effect of a hydrophobic treatment on the moisture balance and durability of a reinforced concrete structure in a road tunnel. MATEC Web of Conferences 364, 04005, ICCRRR, DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236404005>
- Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Glass, G. K., Webb, J. (2012). *Assessing the long-term durability of silanes on reinforced concrete structures* (Version 1). Loughborough University. <https://hdl.handle.net/2134/10925>
- Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Webb, J., Glass, G. K. (2013), *Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures*. Corrosion Science, Volume 69, Pages 123-129, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.032>
- Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A. (2014): *Site performance of galvanic anodes in concrete repairs*. IN: Grantham, M, etal (eds). Concrete Solutions 2014. Proceedings of Concrete Solutions, the 5th International Conference on Concrete Repair, 1st-3rd September 2014, Belfast. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 167-172, <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/16552>
- Dodds, W., Christodoulou, C. (2018), *Hybrid anode concrete corrosion protection – independent study*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 171(4), pp: 149-160, DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00024>
- Guy, T. (2000), *CEBTP, France, report No 2393.6.100*.
- Heiyantuduwa, R., Alexander, M. G., Mackechnie, J. R. (2006), *Performance of a Penetrating Corrosion Inhibitor in Concrete Affected by Carbonation-Induced Corrosion*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, Issue 6, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:6\(842\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(842))
- Holmes, S., Glass, G. K., Wilcox, G. D., Robins, P. J., Roberts, A. C. (2011), *The Response of Protective Current to Environmental Conditions During Hybrid Anode Concrete Repair Treatments*. NACE Conference Papers, 11005.
- Loziquez, E., Barthélémy, J. -F., Bouteiller, V., Desbois, T. (2018), *Contribution of Sacrificial Anode in reinforced concrete patch repair: Results of numerical simulations*. Construction and Building Materials, Volume 178, 30, Pages 405-417, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.063>
- Mozaryn, T., Kokowska, J. (2009), *Service life of coating systems applied on cooling towers - A laboratory study and in-situ investigations*. Book title: NUCPERF 2009 - Long Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management. Editor(s): V. L'Hostis, R. Gens, C. Gallé. Publisher: RILEM Publications SARL.
- Page, C. L., Treadaway, K. W. J. (1982), *Aspects of the electrochemistry of steel in concrete*, Nature, 297, 109-115, DOI: <https://doi.org/10.1038/297109a0>
- Page, C. L., Sergi, G. (2000), *Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12, Issue 1, 8-15. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:1\(8\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(8))

- Qian, S., Zhang, J., Qu, D. (2006), *Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures*, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 8, Pages 685-695, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010>
- Rodum, E., et al, (2012), The Norwegian Public Roads Administration, Trondheim, Norway, effect of different surface treatment products after 10 years of field exposure, presented at ICDC conference in June, Norway
- SAMARIS (2003-2005), *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure*, European, URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/sustainable-and-advanced-materials-road-infrastructure>
- Sergi, G., Whitmore, D. (2010), *Performance of Zinc Sacrificial Anodes For Long-term Control of Reinforcement Corrosion*. NACE - International Corrosion Conference Series.
- Silva, N. (2013), *Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete*. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy.
- Tilly, G. P., Jacobs, J. (2007) *Concrete repairs – Performance in service and current practice*. CONREPNET, ISBN 978-1-86.81-974-2.
- Tritthart, J. (2003), *Transport of a surface applied corrosion inhibitor in cement paste and in concrete*. Cement and Concrete Research, 33(6):829-834, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01067-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01067-0)
- Transportation Research Board of the National Academies (2009), *NCHRP SYNTHESIS 398, Cathodic Protection for Life Extension of Existing Reinforced Concrete Bridge Elements A Synthesis of Highway Practice*, CONCORR Inc, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.

Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México

P. Angulo^{1*}, C. Ochoa¹

*Autor de Contacto: tapy_angulo@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

Recibido: 06/09/2022 | Correcciones recibidas: 11/04/2023 | Aceptado: 14/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es identificar y discutir las estrategias sostenibles más ecoeficientes para aprovechar o reducir emisiones de NO_x, SO_x y polvos de SiO₂ en la fabricación de cemento, con el objetivo de mejorar la competitividad en la industria cementera de México. El diseño de investigación fue cualitativo, observacional y deductivo. Los resultados mostraron que los biorreactores de residuos de SO_x tienen mayor ecoeficiencia; seguido de los domos para capturar y aprovechar el SiO₂ y los filtros de mangas. Estas estrategias son efectivas para contaminantes específicos derivados de la producción de cemento. Este estudio indaga en un tema escasamente abordado en México, la sostenibilidad del cemento. Al aplicar estas estrategias, el sector cementero mexicano impulsaría su competitividad empresarial.

Palabras clave: competitividad empresarial; indicadores de competitividad; sostenibilidad; industria cementera.

Citar como: Angulo, P., Ochoa, C. (2023), “Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 254 – 270, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

¹ Fundación Universitaria Iberoamericana, Ciudad de México, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, la autora Patricia Angulo contribuyó con la idea original, la recolección de datos y la escritura del artículo. El autor Carlos Ochoa contribuyó con el planteamiento metodológico, la discusión de resultados y la revisión del documento.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Sustainability strategies for greater competitiveness in the cement industry of Mexico

ABSTRACT

The objective of this research is to identify and discuss the most eco-efficient sustainable strategies to take advantage of or reduce emissions of NO_x, SO_x and SiO₂ dust in cement manufacturing, with the aim of improving competitiveness in the Mexican cement industry. The research design was qualitative, observational and deductive. The results showed that SO_x waste bioreactors have greater eco-efficiency, followed by domes to capture and use SiO₂ and baghouses. These strategies are effective for specific pollutants derived from cement production. This study explores a topic that has been scarcely addressed in Mexico, cement sustainability. By applying these strategies, the Mexican cement sector would boost its business competitiveness.

Keywords: business competitiveness; competitiveness indicators; sustainability; cement industry.

Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade na indústria cimenteira do México

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é identificar e discutir as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir as emissões de poeiras de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, com o objetivo de melhorar a competitividade da indústria cimenteira no México. Seguiu-se um desenho de pesquisa qualitativa, observacional e dedutiva. Os resultados mostraram que os biorreatores de resíduos de SO_x têm maior ecoeficiência; seguido por cúpulas para capturar e aproveitar SiO₂ e filtros de mangas. Estas estratégias são eficazes para contaminantes específicos derivados da produção de cimento. Este estudo investiga um tema raramente abordado no México, a sustentabilidade do cimento. Ao aplicar estas estratégias, o sector do cimento mexicano aumentaria a sua competitividade empresarial.

Palavras-chave: competitividade empresarial; indicadores de competitividade; sustentabilidade; indústria de cimento.

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

Una competitividad alineada a regímenes de sostenibilidad ambiental garantiza a toda organización empresarial el éxito productivo, una economía estable, la sobrevivencia empresarial y permite que adopte las transformaciones que exigen los cambios del mundo globalizado. La innovación científica y el desarrollo tecnológico aportan las herramientas y los medios necesarios para el diseño de mejores estrategias productivas y ecoeficientes, así como para una toma de decisiones más objetiva (Jaramillo, 2017).

Este estudio se enfoca en la industria del cemento, un sector que libera al medio ambiente una gran cantidad de gases con efecto invernadero y otros compuestos contaminantes. Esta situación representa un reto importante que debe ser resuelto para garantizar la salud de las generaciones futuras (León-Velez y Guillén-Mena, 2020; Rodgers, 2018; Kumar, 2018). En este contexto, desarrollar la competitividad empresarial en la industria cementera mexicana implica un análisis de la viabilidad y aplicabilidad de estrategias sostenibles y ecoeficientes en el proceso productivo del cemento. El estudio de estas estrategias puede reforzar el control de calidad en la fabricación de este material y brinda una mejor comprensión y dominio en temas como el medio ambiente, aspectos legales, ética, costos y gestión de seguridad en el sector de construcción. Además, los resultados observados en compañías cementeras internacionales y algunas locales pueden contribuir a mejorar el uso y preservación de los recursos con los que cuenta la industria cementera mexicana.

1.1 La competitividad empresarial desde un enfoque sostenible

La competitividad empresarial busca lograr una mayor estabilidad, mayor competencia en el mercado y una productividad basada en procesos sostenibles, garantizando así la vida de una empresa a largo plazo. La adopción de estrategias productivas más ecoeficientes va en línea con las prerrogativas que enmarca la Agenda 2030 para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 2016 (Rivera-Hernández et. al., 2018; ONU, 2018). La sostenibilidad refiere al uso adecuado, desarrollo y recuperación de todos los recursos tangibles e intangibles, materiales y naturales con los que cuenta una organización empresarial o industrial, permitiendo así su estabilidad y productividad a largo plazo (Roy, 2021). En este punto es importante no confundir los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad. El primero aborda el cuidado y uso de los recursos naturales, mientras que el segundo refiere al desarrollo relacionado con el cuidado al medio ambiente (Rivera-Hernández et.al., Ruggerio, 2021).

Los ODS que se relacionan de forma directa con un sector industrial sostenible son una producción y consumo responsables, acción por el clima, preservación de la vida submarina y ecosistemas terrestres, agua limpia y saneamiento, así como el acceso a energía no contaminante. Estos ODS están ligados al desarrollo humano comunitario a nivel local, regional y global. Además, confluyen con la sustentabilidad ambiental de tal forma que promueven un óptimo desarrollo y salud comunitarios (ONU, 2018; Balanzátegui et.al., 2019; The Cement Sustainability Initiative o CSI, 2019).

La evidencia muestra que un corporativo industrial puede mejorar su desarrollo, reputación social, imagen empresarial y genera rendimientos económicos a largo plazo cuando opera bajo los términos reales de sostenibilidad, Responsabilidad Social Corporativa (RSC) y Responsabilidad Medio Ambiental Corporativa (RMAC); sobre todo si sus acciones sobrepasan los intereses y obligaciones legales (González y Cuesta, 2018). El proceso general que conlleva al desarrollo de una mayor competitividad empresarial en términos sostenibles implica:

- identificar objetivos y metas adecuadas a las características de cada organización;
- definir los planes estratégicos de acción;

- generar un sistema de indicadores que muestren la información derivada de la actividad empresarial
- aplicar evaluaciones de su comportamiento.

Es preciso señalar que el diseño de las estrategias y acciones es diferente en cada compañía, porque depende de los resultados de un diagnóstico previo que muestre sus deficiencias, potencialidades, recursos, etcétera (Vega, 2017). Bajo esta sintonía de ideas, la reutilización de los residuos industriales como materia prima en los procesos productivos o la innovación productiva basada en otras estrategias ecoeficientes, son acciones que fortalecen la RMAC de cualquier industria. La experiencia muestra que su implementación reduce los costos productivos y la emisión de gases y demás compuestos contaminantes (Bravo y Arroyo, 2018; Pérez et.al., 2016; Lin et.al, 2017).

1.2 Indicadores de competitividad aplicables en la industria cementera

Tanto el desempeño productivo como el económico son indicadores básicos de competitividad en la industria del cemento. Pérez et.al. (2013) propusieron otros indicadores potenciales que pueden abordarse desde el nivel organizacional y que impulsan en mayor medida la competitividad empresarial en este sector, como:

- Participación en el mercado mundial y una buena posición internacional. Genera mayor crecimiento e integración del propio mercado.
- Desarrollo de RSC y RMAC. Maximiza las funciones y mejora la imagen corporativa.
- Competitividad en precios. Impulsa precios atractivos para el mercado.
- Competitividad tecnológica. Aumenta la productividad mediante la oferta de productos diferenciados.
- Competitividad auténtica o genuina. Incrementa la calidad y la eficiencia productiva mediante el aprovechamiento de economías de escala y diferenciación de productos.
- Competitividad espuria. Genera un sistema de industrialización protegida, reduce la competencia local excesiva y conduce a la estabilidad financiera. Además, permite a las empresas contar con subsidios gubernamentales que tienen su origen en la devaluación de la moneda y la depresión de salarios.

Autores como López (2018) y el grupo Ciudades del Futuro de Siemens (2018) señalan que la innovación tecnológica también contribuye a mejorar la eficiencia productiva y el procesamiento de datos de forma masiva. Estas innovaciones incluyen el uso de drones, sistemas informáticos y automatizados con funciones en tiempo real, adopción del internet de las cosas y del mantenimiento 4.0 y el uso de materiales avanzados. De igual forma, las tecnologías con enfoque ecológico industrial minimizan la emisión de gases residuales y conducen a un menor consumo de energías renovables. Por su parte, la CSI, que aglutina empresas de todo el mundo, establece prácticas e indicadores de desempeño para el desarrollo sustentable en rubros como seguridad, protección del clima, emisiones al aire, uso de combustibles y materias primas, comunicaciones e impactos locales en la tierra y las comunidades. (CSI, 2012).

En síntesis, la implementación de estrategias sustentables y ecoeficientes en la producción de cemento es una necesidad para la industria a nivel mundial, ya que contribuyen a reducir su efecto nocivo al medio ambiente e impulsan la competitividad de las empresas. Por estas razones, en esta investigación se busca identificar las estrategias sostenibles más ecoeficientes para aprovechar o reducir la emisión de NO_x, SO_x y polvos de SiO₂ en la fabricación de cemento, a fin de mejorar la competitividad de la industria cementera mexicana.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aplicación de estrategias tecnológicas focalizadas en el cuidado y preservación del medio ambiente es actualmente una prerrogativa casi obligatoria en todo el sector productivo empresarial,

porque beneficia en gran medida su competitividad tecnológica e innovadora, además de que su aplicación va en línea con los ODS de la ONU (2018).

La competitividad empresarial en la industria cementera se ve reflejada no solamente en su desempeño económico y nivel de competencia en el mercado, sino también en sus resultados sobre la emisión de residuos contaminantes. En este sentido, las tecnologías adoptadas con el fin de disminuir la emisión de gases de óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógenos (NO_x) y polvos de SiO_2 pueden contribuir a mejorar su competitividad empresarial, sobre todo porque es el sector industrial que más contamina y daña al medio ambiente.

El cemento tipo Portland, mejor conocido como “cemento gris”, se compone principalmente de un polvo fino o *clínker* que contiene compuestos como silicatos de calcio y aluminatos de calcio que, al mezclarse con agua, se fraguan y endurecen a temperatura ambiente o bajo el agua. Los diferentes tipos de cemento varían en su formulación dependiendo del uso que se les dará y la resistencia que se desea obtener (Sanjuán y Chinchón, 2014).

La producción industrial de cemento incluye las fases de cocción y enfriamiento que destacan por sus implicaciones ecológicas adversas durante la quema de combustibles de origen natural como carbón, coque de petróleo, fuelóleo pesado, entre otros. La transformación química que origina el *clínker* recibe el nombre de descarbonatación y consiste en la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C . Esta reacción produce óxido de calcio (CO) y libera cantidades importantes de bióxido de carbono (CO_2). Además, el CO reacciona con los polvos de SiO_2 , con la alúmina u óxido de aluminio (Al_2O_3) y con el óxido de hierro (Fe_2O_3) a altas temperaturas, formando compuestos que dañan el medio ambiente como los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio; todos, elementos formadores del *clínker* (Sanjuán y Chinchón, 2014; Ashby, 2024).).

El enfriamiento del *clínker* también tiene consecuencias ambientales adversas (León-Velez y Guillén-Mena, 2020; Sanjuán y Chinchón, 2014), ya que durante esta fase se usan ventiladores eléctricos que generan un desperdicio secundario de aire-energía, que se liberan a una temperatura de 800°C . Durante el enfriamiento también se emiten a la atmósfera gases contaminantes, principalmente CO , monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de azufre (SO_2). Estos gases se liberan sobre todo cuando no se cuenta con un mecanismo adecuado para su tratamiento.

Según datos recientes, la industria del cemento consume el 40% de la energía primaria del planeta, aproximadamente. Este porcentaje se debe al alto uso que hace del petróleo, gas natural, carbón, biomasa, viento y radiación solar. Esta industria también consume el 60% de la materia prima extraída de la litósfera terrestre (silicatos, corteza y manto terrestre) y produce 5% a 8% de las emisiones globales de CO_2 (León-Velez y Guillén-Mena, 2020; Rodgers, 2018).

Un estudio realizado por la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos durante los años de 2010 a 2017, trató la relación que existe entre la cantidad de cemento producido y el total de emisiones de CO_2 . Sus resultados mostraron que China es el mayor productor de cemento y, consecuentemente, de las emisiones de CO_2 a nivel mundial; detrás se ubican la India, la Unión Europea, Estados Unidos, Vietnam, Turquía, Egipto y otros países productores (Rodgers, 2018).

Por otro lado, y de acuerdo con varios estudios del año 2020 realizados por la Global Cement and Concrete Association (GCCA), el cemento es el material que más se consume en el mundo y, consecuentemente, su proceso productivo es el que genera mayor emisión de CO_2 (alrededor de unas 150 toneladas por segundo); asimismo, estos estudios mostraron que se utiliza un total de 14,000 millones de m^3 de hormigón al año (France 24, 2021).

Como puede observarse, los daños ambientales generados por la producción masiva de cemento representan un obstáculo para fortalecer la competitividad empresarial de este sector, sobre todo porque sus efectos ambientales transgreden los ODS (ONU, 2018). Por eso, no es posible considerarlo como un sector sostenible en términos reales.

Al margen del compromiso de reducir los estragos del cambio climático que han adoptado los líderes de la industria cementera, es necesario que cada compañía aplique estrategias ecoeficientes

que conduzcan a la transformación de sus procesos productivos y evidencien la disminución de sus emisiones contaminantes, mediante evaluaciones respaldadas en evidencia científica (Rodgers, 2018).

La aplicación de modelos sistemáticos para evaluar las emisiones contaminantes antes, durante y después de la aplicación de estrategias sostenibles, representa un marco de referencia objetivo que va más allá de un discurso comprometido. En opinión de algunos expertos, esta vía destaca como principal herramienta para una estimación real de los escenarios posibles. Esto contribuye a una toma de decisiones basada en los resultados que arroja la evidencia científica, la cual conduce a diseñar alternativas viables de solución y se orienta hacia mejores acciones futuras (Gessa, 2016).

2.1 Contexto del problema en México

En México la industria del cemento es fuerte, altamente productiva y rentable, ya que aporta el 1% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. De acuerdo con datos de 2018 de la International Trade Center, esta industria se encontraba en el primer lugar como comercializador de cemento en América Latina; en el lugar 19 como exportador de cemento a nivel mundial y ocupaba el lugar 22 como importador de este producto. Sin embargo, datos más recientes del año 2020 revelaron que actualmente la industria mexicana del cemento ocupa el segundo lugar en América Latina debido a la competencia de la industria cementera china (Clavijo y Guevara, 2020; Aguilar, 2019; Martínez y Alexandre, 2020).

De acuerdo con la Cámara Nacional del Cemento (2020), la industria cementera mexicana se conforma por las compañías Grupo Cemex, Grupos de Cemento Chihuahua (GCC), CYCNA, Cemento y Concreto Moctezuma, Holcim Cementera, Cementos fortaleza y Cementos Cruz Azul. Estas compañías conforman la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM). Según este organismo, el sector cementero produce un total de 40 millones de toneladas de cemento al año y genera más de 170 mil empleos directos e indirectos en el país. Algunas de estas empresas han adoptado las siguientes estrategias para reducir sus emisiones contaminantes:

- Grupo Cemex. Implementación de un modelo de sustentabilidad en sus operaciones que incluye infraestructura energéticamente sustentable (Grupo Cemex, 2021).
- GCC. Fomento de la responsabilidad ambiental y protección del clima para la sustentabilidad económica (GCC, 2023).
- Cemento y Concreto Moctezuma. Desarrollo de tecnología y modernización de las plantas cementeras para reducir los impactos ambientales (Cemento y Concreto Moctezuma, s. f.).
- Cementos Cruz Azul. En algunas de sus plantas se tiene sistemas de tratamiento de agua y de captación de lluvia para ser utilizada. También utilizan fuentes alternativas de energía, en específico biomasa obtenida a través del nopal (Cooperativa la Cruz Azul, 2016).

En 2020 la CANACEM reportó que para mejorar el RSC este sector busca una mejor gestión del coprocesamiento o incineración de los residuos sólidos urbanos provenientes de diversos estados de la república mexicana, como Colima, Baja California Sur, Ciudad de México, Michoacán, Nayarit, Quintana Roo y Sinaloa. Para ello, esta organización interviene mediante la instalación de centros de transferencia, recepción, separación, trituración, compactación, compostaje y biodigestión de los residuos; además los somete a un adecuado tratamiento e inclusión en la producción industrial del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2020).

Aún con la implementación de estas medidas, no es posible afirmar que el sector cementero mexicano sea una industria sustentable ya que muestra claras deficiencias para mostrar científicamente la ecoeficiencia de sus procesos productivos. Por ejemplo, entre las compañías mexicanas, solamente CEMEX ha reportado la reducción de un 30% de su huella de carbono en sus procesos productivos, también afirmó haber reducido a un 10.2% el consumo de agua en los últimos 10 años (García-Muñoz y Pérez-Sánchez, 2020). Al respecto, es preciso enfatizar que dichos datos carecen de información clara sobre el modelo de evaluación que los respalda.

Si bien empresas como CEMEX y cementos Cruz Azul han implementado infinidad de acciones estratégicas que dan muestra de su intención por alinearse a los objetivos de la agenda 2030 de la ONU (García-Muñoz y Pérez-Sánchez, 2020), no existen datos que sustenten a cabalidad sus resultados. Como puede observarse, la industria cementera mexicana necesita mostrar de forma más sistemática la ecoeficiencia en la implementación de sus estrategias sostenibles (León-Velez y Guillén-Mena, 2020).

En este contexto, la evidencia científica internacional y nacional muestra que la aplicación de análisis ecoeficientes permite cuantificar el impacto ambiental de la producción de cemento, sobre todo cuando se busca aprovechar la sustitución de materia prima para el ahorro en recursos naturales no renovables, tales como combustible y agua; o bien, si se desea el aprovechamiento de residuos propios del proceso productivo con el fin de reducir la emisión de gases contaminantes (Pérez et.al., 2013; Sanjuán y Chinchón, 2014; Ruiz et.al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso productivo del cemento no solamente se libera CO_2 a la atmósfera, sino también gases NO_x , SO_x y polvos de SiO_2 , entre otros contaminantes (Kumar, 2018; SEMARNAT, s. f.; Cooperativa la Cruz Azul, s.f.). Los gases NO_x y SO_x merman la calidad de aire y contribuyen al efecto invernadero. Por otro lado, los polvos de SiO_2 representan un importante riesgo a la salud pulmonar de los trabajadores al interior de una planta productora de cemento.

En México no existen estudios que muestren científicamente la ecoeficiencia de las estrategias sostenibles aplicadas a las emisiones residuales de gases SO_x y NO_x y de polvos SiO_2 del proceso productivo del cemento. Aunque algunas empresas como CEMEX y Cementos Cruz Azul afirman aplicar estrategias que parecen alinearse con los ODS de la Agenda 2030 de la ONU. Con la presente investigación se pretende conocer estas estrategias que, además, permitan mejorar la competitividad empresarial del sector cementero.

3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se utilizó un diseño de investigación de corte cualitativo-observacional-deductivo (Hernández et.al., 2014), junto con la aplicación de estrategias de investigación como la búsqueda y selección de información, análisis documental e interpretación de datos.

La búsqueda de literatura se realizó a través de plataformas *online* de investigación científica como Redalyc, Dialnet, Google Scholar y Scielo, usando palabras clave como “gases y producción de cemento”, “gases efecto invernadero”, “producción sustentable de cemento”, “aprovechamiento de residuos industriales”, entre otras. Se seleccionó un aproximado de 35 documentos entre artículos de revistas indexadas y académicas escritas principalmente en español e inglés.

El análisis documental consistió en identificar conceptos clave e ideas innovadoras sobre métodos y análisis de los procesos de interés. La visualización de las soluciones viables a la problemática planteada se basó en el hallazgo de nuevos datos para el contexto mexicano. Entre las principales herramientas de análisis documental que se usaron se encuentran:

- clasificación de la literatura que conforma el estado del arte del problema abordado,
- elaboración de tablas informativas,
- construcción de esquemas, diagramas o mapas conceptuales,
- elaboración de fichas de estudio, entre otras (Hernández et.al., 2014).

La interpretación de los datos de estudios de diseño cualitativo consistió en un “aislamiento de porciones de discursos” (Schettini y Cortazzo, 2015), es decir, en una selección particular de información que los investigadores realizaron mediante la inferencia de algunos aspectos de su investigación. Durante este procedimiento influyen no solamente la hipótesis y los objetivos, sino también el mundo sociocultural, la intuición y la experiencia de vida de quien interpreta.

4. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y PROPUESTA

4.1 Resultados

Con base en la revisión bibliográfica del presente estudio, se identificó que durante el procesamiento base del cemento se suceden un sinnúmero de reacciones químicas, como las de tipo exotérmicas, llamadas así porque liberan energía en forma de calor, luz o sonido durante la formación del *clínker*. Estas reacciones son fuente de compuestos residuales como nitrógeno molecular (N_2), radical amino (NH_2) y agua (H_2O). La mayor cantidad de emisiones contaminantes de SO_2 se generan no solamente durante esta fase del proceso, sino también en la molienda, enfriamiento y empaquetado del producto terminado. El nivel máximo permisible en la emisión de este tipo de residuos es de alrededor de 400 mg/m^3 , que se mide de forma anual con el método de “infrarrojo no disperso NMX-AA-55-1979”, como lo estipula la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales en México (SEMARNAT, s. f.).

El SiO_2 es parte de la materia prima que se utiliza en la producción de cemento, aunque también puede liberarse como residuo durante este proceso e incluso en la fase de almacenamiento del cemento. El polvo generado de la producción del *clínker* es una mezcla de micro partículas de sílice + oxígeno + carbono + aluminio + calcio. Se ha observado que esta mezcla afecta la salud de los trabajadores al interior de una planta productora de cemento, ya que al aspirarla puede generar irritaciones en el tracto respiratorio y la piel. También puede ocasionar daños oculares graves. Dichos efectos se relacionan con el desarrollo de enfermedades crónicas como la silicosis, tuberculosis, cáncer de pulmón o enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Kumar, 2018; Cobo y Estébanez, 2021).

Para reducir al máximo los residuos de NO_x , SO_x y SiO_2 durante el procesamiento industrial del cemento, se necesita considerar las propiedades químicas de la materia prima utilizada, la aplicación de estrategias ecoeficientes como la sustitución de combustibles fósiles, el diseño de sistemas para la captación de residuos, el uso de nanotecnología (Poudyal y Kushal, 2021) y otras estrategias que redunden en este objetivo, tanto a corto, mediano y largo plazo. En la Tabla 1 se analizan diversas estrategias que se han aplicado en México y otros países para reducir la emisión de estos residuos.

Tabla 1. Estrategias internacionales y nacionales para la reducción de NO_x , SO_x y polvos de SiO_2 , derivados del proceso productivo del cemento

Autor, país y año	Objetivo	Estrategia para aprovechar o reducir la emisión de NO_x , SO_x y SiO_2	Ecoeficiencia mostrada	Conclusiones
Comisión Europea, Europa, 2010	Mantener bajas las emisiones de residuos SO_x durante la fase de elaboración del <i>clínker</i> .	Mejores Técnicas Disponibles (MTD): 1.- Permite reducir los gases de combustión durante el precalentamiento y precalcación del horno, mediante la adición de material absorbente o un depurador húmedo.	Valor medio diario de emisión obtenido de SO_2 : $<50 \text{ mg/Nm}^3$, cuando el contenido de azufre en materia es de $<0,10\%$ mg/Nm^3 . $250\text{-}400 \text{ mg/Nm}^3$, si el contenido de	Los márgenes de emisión dependen del contenido de azufre en la materia prima utilizada, por tanto, la estrategia estriba en seleccionar materia prima

Autor, país y año	Objetivo	Estrategia para aprovechar o reducir la emisión de NO _x , SO _x y SiO ₂	Ecoeficiencia mostrada	Conclusiones
		2.- Optimiza los procesos de molienda de materias primas para procesos en seco.	azufre es >0,25% mg/Nm ³ .	con las menores concentraciones de este químico.
CEMEX, México, 2012 y 2016. CSI, 2014.	Sustituir combustibles fósiles y gas con residuos sólidos urbanos u orgánicos, durante la cocción para la formación del <i>clínker</i> .	Aprovechamiento de desechos sólidos urbanos: llantas usadas, residuos solventes de desperdicio, aceites usados, entre otros. Aprovechamiento de residuos orgánicos: cascarilla de arroz, café, sedimentos de aguas residuales, entre otros.	CEMEX redujo su huella de carbono en un 22.7% en 2012, y en 2016 reportó que obtuvo el 26.6% de la energía de sus hornos de biomasa y residuos. No se encontraron datos sobre la eco-eficiencia de estas estrategias. Tampoco presentan resultados para residuos de NO _x , SO _x y SiO ₂ .	La publicación de datos sobre la ecoeficiencia de estas estrategias puede ayudar a sustentar la reducción de la huella de carbono.
Rocha et.al., Bolivia y Brasil, 2022.		Uso de energía y materia prima alternativa con un menor impacto ecológico.	El 85% del Clinker se fabricó con combustibles convencionales en 1990. En 2014, ese porcentaje se redujo a 23%.	
Sagástegui, Perú, 2012.	Captar la mezcla de polvos fugitivos en una planta productora de cemento.	Instalación de domos de captación de polvos fugitivos. Estos domos cuentan con un sistema de filtrado de aire desde el exterior que ayuda a reducir al máximo la emisión de polvo fugitivo. Se instalan sobre los almacenamientos	- Beneficia directamente la salud de los trabajadores. - Su mantenimiento no tiene costos excesivos.	Las micro partículas de SiO ₂ no tiene un efecto medio ambiental importante, pero sí pueden dañar la salud de quienes aspiran sus polvos. Por esta razón, también

Autor, país y año	Objetivo	Estrategia para aprovechar o reducir la emisión de NO _x , SO _x y SIO ₂	Ecoeficiencia mostrada	Conclusiones
		temporales o en la cancha del <i>clínker</i> .		se recomienda que los trabajadores usen equipo de protección especial con mascarilla.
Sanjuán y Chinchón, España, 2014	Reducir las partículas de polvo y gases contaminantes emitidos por fuentes localizadas.	Uso de precipitador electrostático o filtros de mangas Absorbentes de SO ₂ . Se aplican en hornos por vía seca.	Generalmente se producen emisiones <50 mg/Nm ³ .	Tanto el precipitador como los filtros de mangas funcionan en puntos de carga, descarga y transporte. Han mostrado reducir gases NO _x y SO _x .
Feijoó et.al., Cuba, 2016. CSI, 2012.	Realizar un balance de las principales reacciones químicas que sufre el azufre durante el procesado del cemento.	Sistema de monitorización química estequiométrica. Se basa en el cálculo de la masa molar del azufre y sus reacciones químicas.	Detecta valores de referencia estándar de SO ₃ y Na ₂ O, necesarios para que el procesado de cemento ocurra de forma óptima.	Este sistema permite saber cuándo se deben aplicar estrategias para evitar anillos de azufre en el horno.
Veana et al., México, 2019.	Producir bioenergía en forma de biogás metano puro.	Biorreactor que procesa residuos agroindustriales. Produce una interacción bioquímica de compuestos orgánicos con contenidos de biometano + dióxido de carbono + vapor de agua + hidrógeno + sulfuro de hidrógeno.	Se basa en reacciones bioquímicas de bacterias quimiolitotróficas, cuyo procesamiento garantiza una menor emisión de gases y residuos contaminantes.	Este biorreactor destaca por su doble funcionalidad en el proceso productivo del cemento. Por un lado, permite procesar los residuos generados de SO _x y, por el otro, produce biogás metano que puede usarse en lugar de

Autor, país y año	Objetivo	Estrategia para aprovechar o reducir la emisión de NO _x , SO _x y SiO ₂	Ecoeficiencia mostrada	Conclusiones
				combustibles fósiles.
Badillo et al., México, 2020.	Termovalorización en la separación de los residuos para producir fuentes alternas de combustible para el sector cementero.	Termovalorización de los residuos y su aprovechamiento. Residuos como los textiles son procesados como combustible en la producción del <i>clínker</i> .	No muestra especificidad para residuos tipo NO _x , SO _x y polvos de SiO ₂ .	Podría favorecer un cambio de actitud en la población, ya que promueve la separación de basura. Requiere de la colaboración conjunta entre la población y el sector cementero.
Poudyal y Kushal, Estados Unidos, 2021.	Enfoque integrado para la producción sostenible de cemento.	Captación de CO ₂ para producir CaCO ₃ que puede utilizarse como insumo.	Integración de tres estrategias: captura de emisiones, sustitución de materiales y combustible y uso de nanotecnología.	La adopción de estas estrategias puede tener beneficios para el medio ambiente y la sociedad.

Fuente: Elaboración propia con base en datos recabados de la Comisión Europea (2010), CEMEX (2012), CEMEX (2016), CSI (2014), Rocha et.al. (2022), Sagástegui (2012), Sanjuán y Chinchón (2014), Feijoó et.al. (2016), CSI (2012), Veana et.al. (2019), Badillo et.al. (2020) y Poudyal y Kushal (2021).

4.2 Discusión

Al comparar estas estrategias con otros estudios o revisiones documentales se encontraron algunas similitudes. En cuanto a la sustitución de combustibles fósiles, la cementera CEMEX afirmó que el 26% de sus hornos operaban con biomasa o residuos en 2016 (CEMEX, 2016), una cifra que concuerda con la reportada por Teja et.al. (2022) que fue del 20% al 30%. Cabe destacar que es posible sustituir del 3% al 80% del *clínker* con cenizas de biomasa.

En contraste, Huh et.al. (2018) reportó que el mayor problema para la sustitución de combustibles fósiles por biomasa es que este último sigue siendo más costoso. En su estudio compararon las utilidades marginales de empresas coreanas usando diferentes tipos de combustibles en sus procesos y encontraron que el carbón sigue siendo mejor que otras fuentes de energías alternativas, al menos en cuanto al costo, lo que dificulta su uso en muchas empresas.

Guo et.al. (2023) también realizaron una revisión documental para identificar estrategias que permitan reducir el impacto ecológico de la producción de cemento. En sus resultados mostraron que algunas se centran en mejorar la eficiencia de los procesos y la reducción del gasto de energía

y se llevan a cabo principalmente en países asiáticos como China e India. Estas estrategias coinciden con la ya mencionada sustitución de energías fósiles por combustibles alternativos (Badillo et.al., 2020, CEMEX, 2016) y con aquellas que contribuyen a mantener niveles adecuados de emisiones contaminantes, como el sistema de monitorización química o los filtros de manga (Figura 1 y Figura 2).

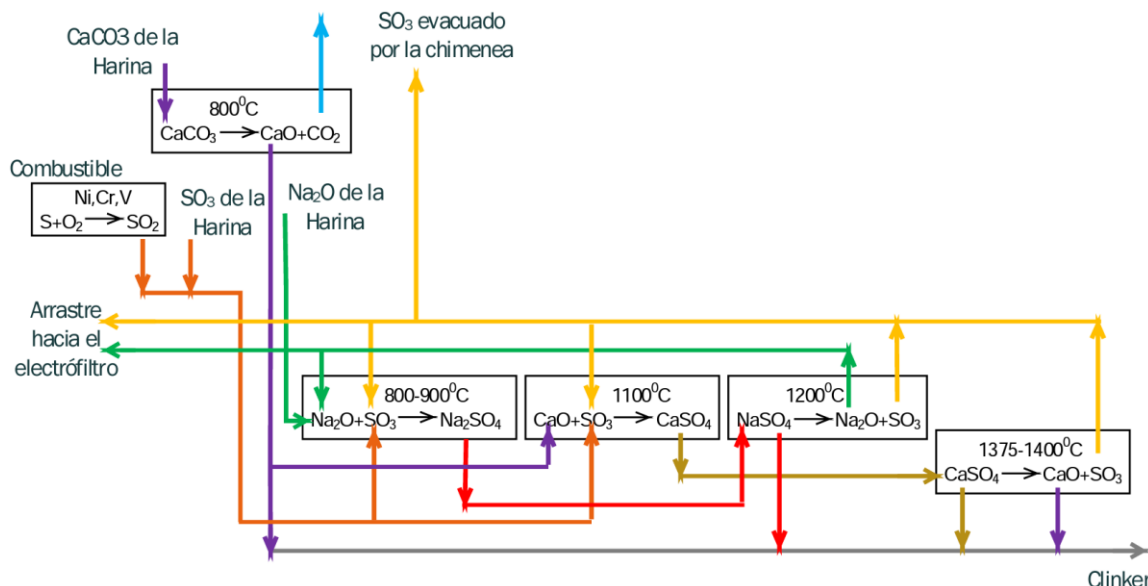


Figura 1. Sistema de monitorización química estequiométrica. Fuente: Feijoó et.al. (2016).

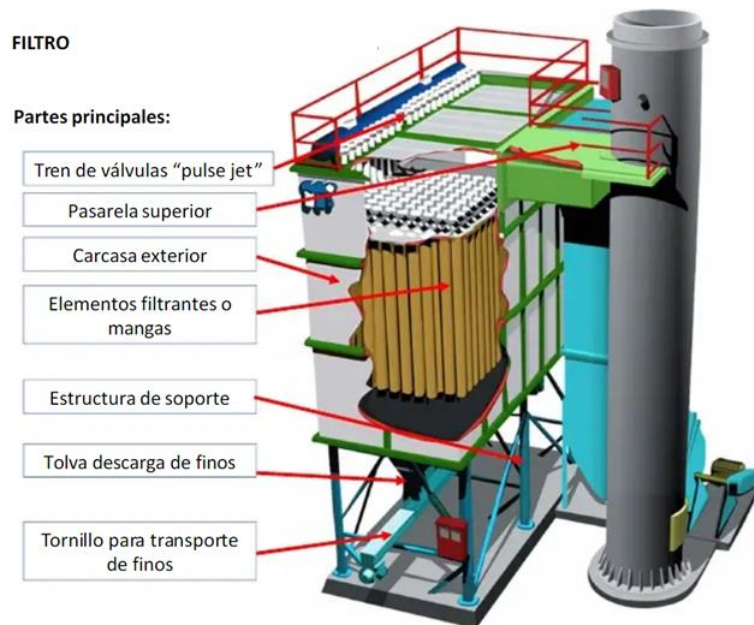


Figura 2. Filtro de manga utilizado en la industria cementera. Fuente: Camargo (s. f.).

Otro tipo de estrategias reportadas por Guo et al. (2023) se relacionan con el desarrollo de tecnologías para capturar, utilizar y almacenar las emisiones de carbono, cuya implementación ocurre mayoritariamente en países europeos. En este estudio se encontraron estrategias de este tipo adoptadas en México y otros países de habla hispana, como los domos para captar SiO_2 (Sagástegui, 2012) o la transformación de residuos de SO_x en biorreactores por medio de procesos de oxidación del azufre (Figura 3).

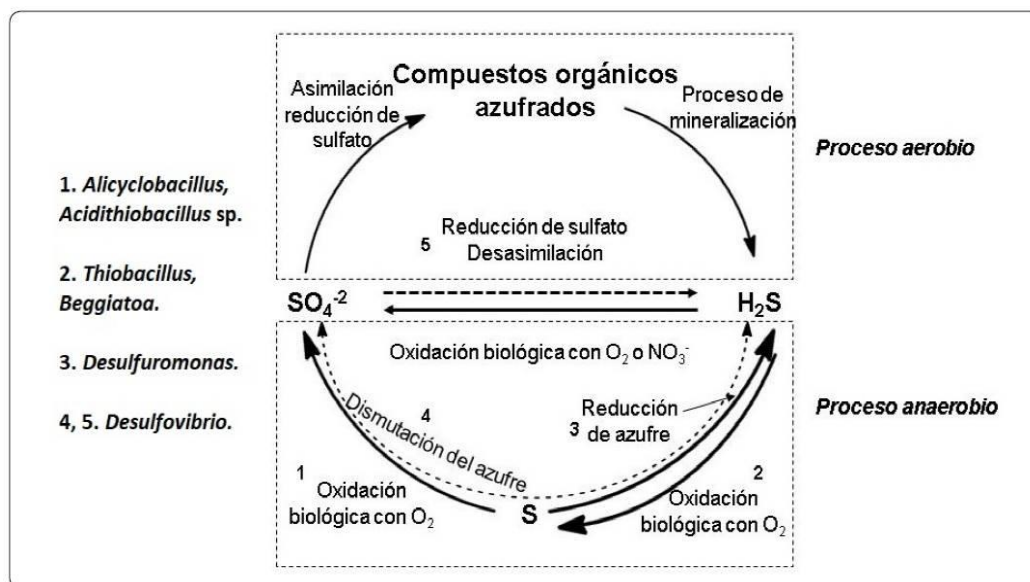


Figura 3. Ejemplo del ciclo generado en biorreactor. Fuente: Veana et.al. (2020).

4.3 Propuesta

Para visualizar la prioridad e importancia de las estrategias sostenibles analizadas, en la Figura 4 se ordenan de acuerdo con su viabilidad de aplicación en el sector industrial cementero en México. Las opciones ubicadas en la cúspide de la pirámide mostraron mayor ecoeficiencia y beneficios, de acuerdo con la evidencia científica que las sustenta.

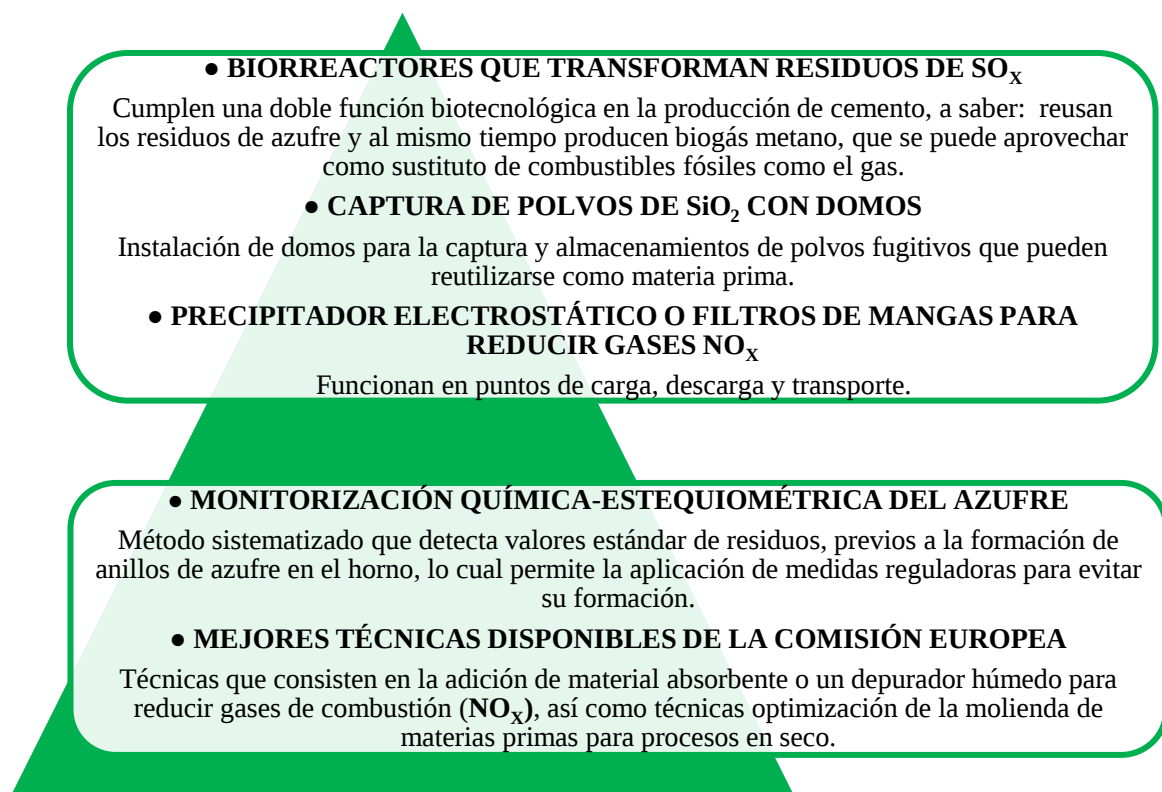


Figura 4. Diagrama jerárquico de estrategias ecoeficientes que han probado reducir al máximo la emisión de residuos NO_x , SO_x y polvos de SiO_2 durante la producción del cemento.

5. CONCLUSIONES

Los biorreactores de SO_x muestran mayor ecoeficiencia porque reutilizan los residuos de azufre y producen biogás metano que es útil como combustible, los domos capturan polvos de SiO_2 que se pueden reutilizar como materia prima y los filtros de mangas probaron reducir la emisión de gases residuales NO_x . La adopción de estas estrategias permitiría al sector cementero mexicano probar con evidencia científica la ecoeficiencia de sus procesos productivos. Hasta la redacción de este artículo, solamente CEMEX y Cementos Cruz Azul han adoptado estrategias como la sustitución de fuentes de energía fósiles por biomasa o residuos, pero no refieren la aplicación de otras estrategias para mitigar la emisión de los contaminantes considerados en esta propuesta.

Asimismo, las cementeras mexicanas obtendrían un valor agregado en sus procesos productivos y el cemento terminado cuando siguen procesos ecoeficientes. Todo esto contribuiría a fortalecer su competitividad empresarial, cuyos beneficios van más allá de solamente obtener las certificaciones ambientales que exige la ley.

También es necesario redoblar esfuerzos para revisar con mayor profundidad si las estrategias que han venido adoptando las cementeras en México son realmente sostenibles y están alineadas a los ODS de la ONU. Nuevamente CEMEX y Cementos Cruz Azul son las únicas cementeras que parecen alinearse con estos objetivos mediante sus estrategias de sustitución de combustibles fósiles. El resto cementeras mexicanas expresan un compromiso con el desarrollo sostenible, pero no presentan estrategias o indicadores para reducir su impacto ambiental.

Finalmente, se sugiere implementar mejores métodos para evaluar los resultados antes, durante y después de la aplicación de estrategias sostenibles en este sector, ya que esto brindaría mayor certeza sobre su ecoeficiencia. Se reitera que el gran reto a enfrentar por este sector es que los métodos sostenibles que aplica prueben, bajo evidencia científica, su ecoeficiencia.

6. REFERENCIAS

- Aguilar, J. D. (2019), *Cemento, el oro gris mexicano*. Consultado el 23 de marzo de 2023. <https://www.milenio.com/especiales/cemento-el-oro-gris-mexicano>
- Ashby, M. F. (2024), “*Materials and Sustainable Development*”. Elsevier, España, pp. 377–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98361-7.00016-6>
- Badillo, M. M., Martínez, L. A., Flores, J. R., y Flores, J. I. (2020), “*La termovaloración de combustibles alternativos y materias primas (AFR) en hornos para la producción de cemento Portland: una opción sostenible*”. Academia Journals, Hidalgo, México.
- Balanzátegui, R. I., Coba, L. M. y Vega, J. G. (2019), *Desarrollo sostenible de proyectos productivos sobre la base de la ley de Economía Popular Solidaria*. Revista Espacios. 40(22): 4-21.
- Bravo, D. N. y Arroyo, F. R. (2018), *Innovación sustentable: un camino al desarrollo productivo del Ecuador*. Innova Research Journal. 3(5): 29-44. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n5.2018.512>
- Cámara Nacional del Cemento (2020), *Co-procesamiento en la industria del cemento: Alternativa de manejo de residuos ambientalmente segura*. Consultado el 24 de marzo de 2023. https://comisiones.senado.gob.mx/ambiente/reu/docs/presentacion4_e121020.pdf
- Camargo, G. (s. f.), *Filtro de Mangas Partes y Funcionamiento*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://es.scribd.com/document/439978098/Filtro-de-Mangas-Partes-y-Funcionamiento#>
- Cemento y Concreto Moctezuma (s. f.), *Compromiso por contribuir al desarrollo social*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cmoctezuma.com.mx/desarrollo-sostenible>
- CEMEX (2016), “*La contribución de CEMEX hacia un futuro bajo en carbono. Postura de CEMEX respecto al cambio climático*”. CEMEX, México.

- CEMEX. (2012), “*Construyendo las ciudades del futuro. Informe de desarrollo sustentable*”. CEMEX, México.
- Ciudades del Futuro (2018), *Cemento 4.0: la disrupción tecnológica llega a la industria cementera*. Siemens. Consultado el 20 de marzo de 2023. <https://ciudadesdelfuturo.es/cemento-4-0-la-disrupcion-tecnologica-llega-la-industria-cementera.php>
- Clavijo, P. A. y Guevara, M. M. (2019), “*Análisis Sostenible de la Cementera Holcim con Repercusiones de Mercadeo y Finanzas*”, Trabajo de Grado, Universidad del Rosario, Bogotá.
- Cobo, M. E. y Estébanez, S. (2021), “*Guía para el control de la exposición a polvo de sílice*”. Asepeyo prevención, Madrid, España.
- Comisión Europea (2017), “*Prevención y control integrados de la contaminación. Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio*”. Observatorio de la economía circular en la industria cementera, Sevilla, España.
- Cooperativa la Cruz Azul (2016), *La Cruz Azul y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.aciamericas.coop/IMG/pdf/apolinarortiz.pdf>
- Cooperativa La Cruz Azul (s. f.), *Medición isocinética a fuentes fijas y perimetral de partículas*. Consultado el 18 de marzo de 2023. <https://acortar.link/MpNMMyg>
- Feijoó, J. A., Fabelo, J. A. y Rodríguez, I. L. (2017), *Evaluación del ciclo del azufre en el horno de la fábrica de cemento de Cienfuegos*. Revista Centro Azúcar. 44(2): 1-9.
- France 24 (2021), *El hormigón, tercer emisor mundial de gases de efecto invernadero*. Consultado el 21 de marzo de 2023. <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero>
- García-Muñoz, A. C. y Pérez-Sánchez, B. (2020), *La responsabilidad social en CEMEX*. Investigación Valdizana. 14(4): 175–87. <https://doi.org/10.33554/riv.14.4.728>
- Gessa, P. A. y Sancha, D. M. P. (2016), *Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación*. Innovar. 26(60): 51–66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>
- González, M. J. y Cuesta, V. P. (2018), *De responsabilidad social a sostenibilidad corporativa: una revisión actualizada*. Revista Internacional de Investigación en Comunicación. 17(7): 46-71. <https://doi.org/10.7263/adresic-017-04>
- Grupo Cemex (2021), *Sostenibilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cemexmexico.com/sostenibilidad>
- Grupos de Cemento Chihuahua (2023), *Sustentabilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.gcc.com/es/sustentabilidad/#:~:text=La%20estrategia%20de%20sustentabilidad%20de,para%20esta%20y%20pr%C3%B3ximas%20generaciones>.
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P. y Zhu, T. (2024), *A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry*. Journal of Environmental Sciences. 136: 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014), “*Metodología de la investigación*”. Mc Graw Hill Education, Distrito Federal, México.
- Huh, S.Y., Lee, H., Shin, J., Lee, D. y Jang, J. (2018), *Inter-fuel substitution path analysis of the korea cement industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82: 4091–4099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.065>
- Jaramillo, R. A. (2017), *Una Mirada a la competitividad*. Dictamen libre. 20:87-98.
- Kumar, C. A. (2018), “*Cement production technology. Principles and Practice*”. CRC Press, Florida, Estados Unidos.
- León-Velez, A. y Guillén-Mena, V. (2020), *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. Ambiente Construido. 20(3): 611-25. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>

- Lin, K.-L., Lo, K.-W., Hung, M.-J., Cheng, T.-W., y Chang, Y.-M. (2017), *Recycling of spent catalyst and waste sludge from industry to substitute raw materials in the preparation of Portland cement clinker*. Sustainable Environment Research, 27(5). <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.05.001>
- López, N. V. (2018), *El papel de la innovación tecnológica industrial y la sustentabilidad. Un acercamiento a la industria cementera*. Tekhné Revista de la Facultad de Ingeniería. 21(2): 83-95.
- Martínez, L. M. y Alexandre, P. M. (2020), *Industria cementera en México: Sin señales de recuperación a pesar de tocar fondo el año pasado*. Consultado el 24 de febrero de 2022. <https://www.spglobal.com/assets/documents/ratings/es/2020-01-22-industria-cementera-mexico.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018), *“La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe”*. ONU-CEPAL, Santiago de Chile, Chile.
- Pérez, E. M. J., Espinoza, C. C. y Peralta, M. B. (2016), *La responsabilidad social empresarial y su enfoque ambiental: una visión sostenible a futuro*. Revista Universidad y Sociedad. 8(3): 169-78.
- Pérez, S. B., Guzmán, S. A., Mayo, C. A. y Heredia, R. H. (2013), *Evolución histórica de cementos mexicanos: un grupo económico de capital nacional*. Hitos de Ciencias Económico Administrativas. 19(55): 115-30. <https://doi.org/10.19136/hitos.a0n55.113>
- Poudyal, L. y Adhikari, K. (2021), *Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production*. Resources, Environment and Sustainability. 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>
- Rivera-Hernández, J. E., Alcántara-Salinas, G., Blanco-Orozco, N., et.al. (2017), *¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto*. Revista Posgrado y Sociedad. 15(1): 57-67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D. y Cayo-Chileno, N. G. (2022), *Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review*. Materials Today: Proceedings. 57, 436–439. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565>
- Rodgers, L. (2018), *La enorme Fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. Consultado el 17 de marzo de 2023. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Roy, M. (2021), *“Sustainable Development Strategies”*. Elsevier, España, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818920-7.00005-0>
- Ruiz, Y., Domínguez, E. R., Sánchez, S., Castillo, L., Martirena, J. F. y Suppen, N. (2017), *Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clínker*. Revista Centro Azúcar. 44: 77–88.
- Ruggerio, C. A. (2021), *Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions*. Science of The Total Environment, 786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sagástegui, D. A. (2012), *“Propuesta para reducir las emisiones de polvo fugitivo en el proceso productivo de una empresa cementera”*, Tesis de ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Santiago de Surco, Perú.
- Sanjuán, M. A. y Chinchón, S. (2014), *“Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland”*. Universidad de Alicante, España.
- Schentini, P. y Cortazzo, I. (2015), *“Análisis de datos cualitativos en la investigación social. Procedimientos y herramientas para la interpretación de información cualitativa”*. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.), *“Guía para la elaboración de la cédula de operación anual. Industria del cemento, cal y yeso”*. SEMARNAT, México.

- Teja, R., Hiremath, R.B, Rajesh, P., Kumar, B., y Renukappa, S. (2022), *Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112503>
- The Cement Sustainability Initiative (2012), “*The Cement Sustainability Initiative*”. World Business Council for Sustainable Development, Washington, DC, Estados Unidos.
- The Cement Sustainability Initiative (2014), “*Cement Industry Energy and CO2 Performance Getting the Numbers Right (GNR)*”. World Business Council for Sustainable Development.
- The Cement Sustainability Initiative (2019), “*Indian Cement Sector SDG Roadmap*”. World Business Council for Sustainable Development, Ginebra, Suiza.
- Veana, F., González-Purata, P. Y., Wong-Paz, J. E., Aguilar-Zárate, P., Muñoz-Márquez, D. B. (2019), *Tendencias de la bioenergía: del metagenoma de hábitats ricos en azufre a la purificación del biogás*. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 22: 1-11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.190>
- Vega, L. A. (2017), *Sustentabilidad y competitividad en empresas hortícolas de México*. Sapientiae. 2(2): 110-26.