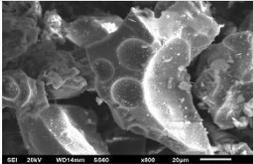


Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2>
editorial@revistaalconpat.org

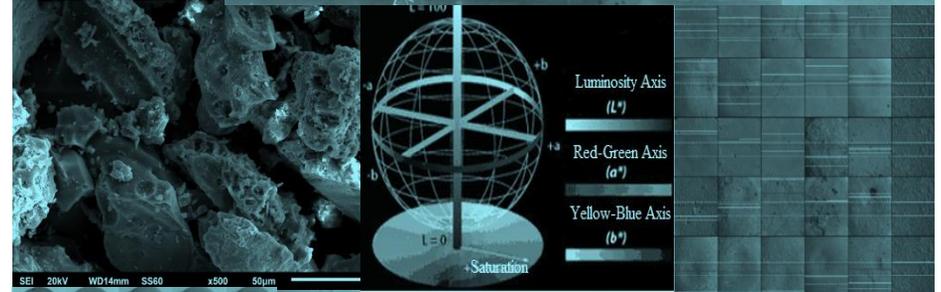
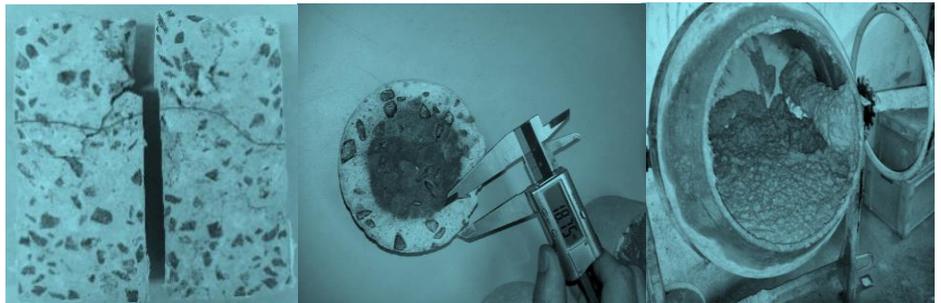
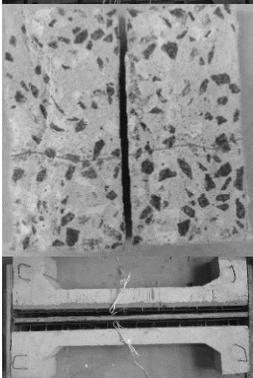
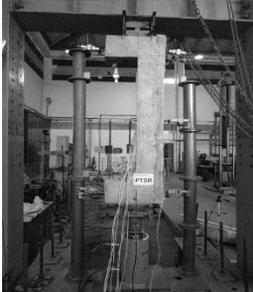
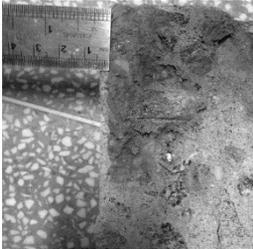


eISSN: 2007-6835

Volumen 8

Mayo - Agosto 2018

Número 2



Revista Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

<http://www.revistaalconpat.org>



ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Presidente

Carmen Andrade Perdrrix, **España**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Iván Escalante García, **México**

Vicepresidente Técnico

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Vicepresidente Administrativo Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

Gestor

Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

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

Co-Editor en Jefe:

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

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas Universidad
Politécnica de Madrid. Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dr. Mauricio López.

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

Dra. Oladis Troconis de Rincón Centro de Estudios de

Corrosión Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco Universidad

Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Mexicano del Transporte / Universidad Marista de
Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –
INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

Mensaje del Editor en Jefe

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

<http://www.revistaalconpat.org>

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

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

Esta edición V8N2, inicia con un trabajo procedente de **Brasil**, donde Romildo Berenguer y colegas analizan, a través de ensayos químicos, la cantidad de iones cloruros en concretos de diferentes dosificaciones en sus profundidades. Para ello, realizaron ensayos en laboratorio, siendo confeccionadas probetas para inmersión parcial en agua de mar y analizables según las normas y el método de Mohr. Con los resultados se verificó que el porcentaje de penetración de iones cloruro es menor para la dosificación, con relación a las demás probetas. Se concluyó que cuanto mayor sea la resistencia del concreto, mayor será la resistencia a la penetración de los iones cloruros, sin embargo, estos resultados son esperados, pues el concreto con mayor resistencia y mismos materiales tiende a dificultar la entrada de estos iones.

En el segundo trabajo, procedente de **Brasil**, Carina Ferreira y colegas verificaron la compatibilidad de un modelo de expectativa de vida útil existente con la penetración de cloruros en elementos de concreto expuestos en la ciudad de Pelotas / RS. Para hacer esto, las probetas fueron expuestas en diferentes partes de la ciudad por un período de 16 meses, aplicando la solución de nitrato de plata para determinar la profundidad de los cloruros. El modelo de Bob (1996) fue utilizado para la comparación y el análisis de los resultados. Se encontraron valores significativos de cloruro en los elementos y potencialidad de aplicación del modelo en describir el comportamiento de la profundidad de los cloruros a lo largo del tiempo, a pesar de las diferencias encontradas.

En el tercer artículo procedente de **Brasil**, Rosana Schmalz y colegas presentan un estudio de la influencia de la nanosílice dispersa en superplastificante, y su efecto combinado con la sílice activa, en diferentes propiedades de los hormigones. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad, además de ensayos acelerados de durabilidad frente a los iones de cloruro. Los resultados indicaron que la adición de nanosílice (0.1 a 0.5%) no mejoró los hormigones en ninguno de los ensayos realizados. Por otro lado, para los contenidos de 0.5 y 0.7% de nanosílice

combinados con 10% de sílice activa, hubo un aumento en la resistencia a la compresión, reducción de la absorción capilar y reducción de la penetración de cloruros.

El cuarto artículo, de Denio R. C. de Oliveira y colegas, proviene de **Brasil**; ellos investigan el comportamiento de seis columnas a flexo-compresión con sección inicial (120 x 200) mm², sección final (200 x 200) mm² y altura de 1.600 mm, reforzadas en los lados traccionados y comprimidos con revoque preexistente o no. La adherencia entre hormigón nuevo y viejo, y patrón de fisuración fueron satisfactorios. Aunque los pilares revestidos tienen el mismo comportamiento de los no revestidos, incluso cuando el área de hormigón se redujo en aproximadamente 20%, los problemas consistieron en el aplastamiento de la capa de refuerzo inmediatamente antes de la ruptura de los pilares. Este refuerzo resultó ser más adecuado cuando se realiza en la zona comprimida, a través de procedimientos convencionales con o sin capa de revoco de mortero.

El quinto trabajo de este número lo escriben Wilfrido Martínez y colegas de **México**, ellos cuantificaron los valores de los diferentes colores obtenidos en arcillas con adiciones, comparados contra una arcilla base. Se exploró la apreciación estética, con base al color de las arcillas con diferentes adiciones usando arcilla del Banco Santiago Undameo, México. Las adiciones son yeso, cal, mucílago de cactus opuntia, cemento portland e hidróxido de sodio. Los porcentajes en peso fueron 2, 4, 6, 8 y 10%. Los mejores comportamientos colorimétricos fueron los resultados obtenidos del cemento portland al 6%, hidróxido de sodio al 4%, cal y yeso al 8% y mucílago de cactus opuntia blanco con porcentajes al 4 y 8%. Algunas construcciones donde se emplearon estos materiales arcillosos son: Casas Grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco; Yácatas en Tzintzuntzán, entre otros.

En el sexto trabajo, procedente de **Brasil**, Romildo Berenguer y colegas buscan discutir o efectuar dos incorporadores de comportamiento no mecánico y durabilidad de elementos de hormigón moldeado en sitio. El experimento fue desarrollado con un conjunto de muestras con 4 masas específicas diferentes (1500 kg / m³, 1700kg / m³, 2000kg / m³ y 2300kg / m³) y 3 relaciones agua / cemento (0,63 - 1: 5, 0,50 - 1: 4, 0,43 - 1: 3), pruebas para determinar la resistencia a la compresión, absorción de agua, velocidad de profundidad y profundidad de la carbonatación. Los resultados obtenidos no son expresivos, no se comportan como indicadores de protección de la armadura (absorción de agua y carbonatación), o que confirme la necesidad de usar suavizantes de agua adicionales para la estructura (tintas de protección, barras de acero inoxidable) debido a la pérdida prematura de la durabilidad a lo largo de su vida útil.

En el séptimo trabajo, procedente de **México**, José Manuel Mendoza Rangel y colegas presentan un estudio sobre la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del Cemento Portland Compuesto (CPC) para mejorar las propiedades de un suelo granular arenoso. Se llevaron a cabo ensayos de compactación AASHTO estándar,

resistencia a la compresión simple y CBR, comparándose el comportamiento del suelo natural en estudio y mezclado con porcentajes de 3%, 5% y 7% de cemento portland como porcentajes de control, realizándose sustituciones parciales del mismo por CBCA en porcentajes de 0%, 25%, 50% y 100% con respecto al peso del suelo en estado seco. Los resultados mostraron mejoras en el suelo en las características de compactación, resistencia a la compresión y CBR, reduciéndose hasta un 25% el consumo del CPC.

El artículo que cierra la edición es de Eduarda L. Machado y colegas de **Brasil**, quienes presentan un estudio de como identificar si el uso de un software de plataforma BIM asociado con el método AHP de toma de decisión, puede auxiliar en el proceso decisorio durante la fase de concepción de proyectos. Se analizan tres sistemas constructivos: Albañilería estructural, Light Steel Framing y Light Wood Framing. El modelado en BIM permitió simulaciones de escenarios y facilitó la extracción de datos, que a su vez ayudaron a los especialistas en la selección del sistema constructivo más adecuado, considerando los criterios establecidos. La originalidad de esta investigación está en considerar varios factores relevantes a la elección del sistema constructivo, y su limitación está en el modelado solamente de las paredes de los sistemas constructivos analizados, y no de la edificación completa.

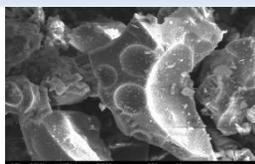
Este segundo número abre con la noticia de que RA ha cumplido los requisitos de calidad para su incorporación en Scopus y en JCR. Por ello, a principios de año, se realizó la aplicación correspondiente. Estaremos en evaluación durante 1 – 4 años, después de los cuales estoy seguro quedaremos incorporados. Ahora, es indispensable cumplir y seguir cumpliendo los parámetros de calidad, siendo algunos de ellos la puntualidad en la publicación, y en los tres idiomas completos.

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de cloruros, modelado y vida de servicio, así como de inspecciones con metodologías modernas y/o mejoradas. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos.

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



CONTENIDO

INVESTIGACIÓN APLICADA

Página

R. Berenguer, A. Passos, E. C. B. Monteiro, P. Helene, Â. Just, R. Oliveira, M. Medeiros, A. Carneiro: Verificación de penetración de cloruros en probetas parcialmente sumergidas en agua de mar en Recife, Pernambuco. 108-122

C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres: Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS. 123-137

T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira: Evaluación de los efectos del nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones cloruros. 138-149

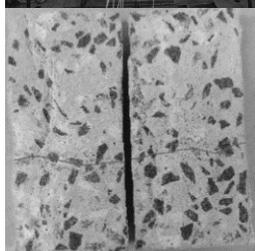
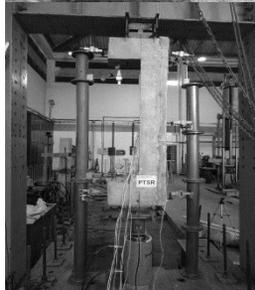
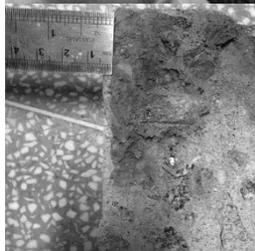
D. R. C. de Oliveira, I. I. R. Damasceno, V. H. L. Branco: Columnas de hormigón armado comprimido de forma excéntrica y reforzados con encamisado parcial. 150-162

W. Martínez, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez, C. Lara, A. Bedolla, H. Z. López, J. L. Ruvalcaba: Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas. 163-177

R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro: Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado. 178-193

O. Ojeda-Farías, J. M. Mendoza-Rangel, M. A. Baltazar-Zamora: Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante. 194-208

E. L. Machado, N. C. Sotsek, S. Scheer, A. de P. L. Santos: Selección de sistemas constructivos utilizando BIM y método de toma de decisión multicriterio. 209-223



Verificación de penetración de cloruros en probetas parcialmente sumergidas en agua de mar en Recife, Pernambuco

R. Berenguer^{1*} , A. Passos² , E. C. B. Monteiro^{2,3} , P. Helene⁴ , Â. Just² , R. Oliveira^{1,2} , M. Medeiros⁵ , A. Carneiro¹ 

*Autor de Contacto: templarios_pm@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.195>

Recepción: 11/08/2017 | Aceptación: 17/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es analizar a través de ensayos químicos, la cantidad de iones cloruros en concretos de diferentes trazos (proporciones de materiales) en sus profundidades. Para ello, se realizaron ensayos en laboratorios, siendo fabricadas probetas con inmersión parcial en agua de mar según las normas y el método de Mohr. Con los resultados se verificó que el porcentaje de penetración de iones cloruro es menor para el trazo rico, en relación con las demás probetas estudiadas. Siendo así, se concluye que cuanto mayor sea la resistencia del concreto, mayor será la resistencia a la penetración de los iones cloruros, sin embargo, estos resultados son esperados, pues el concreto con mayor resistencia y mismos materiales tiende a dificultar la entrada de estos iones.

Palabras clave: iones de cloruro; método de Mohr; agua de mar.

Citar como: R. Berenguer, A. Passos, E. C. B. Monteiro, P. Helene, Â. Just, R. Oliveira, M. Medeiros, A. Carneiro (2018), "Verificación de penetración de cloruros en probetas parcialmente sumergidas en agua de mar en Recife, Pernambuco", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 108 - 122, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.195>

¹ Departamento de Engenharia Civil-Estruturas e Materiales, Universidad Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Universidad Católica de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidad de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

⁴ Ph.D.-Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Rua Visconde em Ouro Negro, Sao Paulo, Brasil

⁵ Departamento de Engenharia de Construcción Civil, Universidad Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil.

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Checking for chloride penetration in test samples partially immersed in seawater in Recife, Pernambuco State

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze, using chemical tests, the quantity of chloride ions in concretes with different traces (proportions of materials) in their depths. To do so, tests were performed in laboratories, and test samples were made with partial immersion in seawater, in accordance with the standards and Mohr method. The results confirmed that the penetration percentage of chloride ions is less for the rich trace, in relation to the others test samples studied. Accordingly, it is concluded that the stronger the concrete the greater the penetration resistance of chloride ions, but these results are to be expected, since the concrete with greatest strength and same materials tends to hinder the entry of those ions.

Keywords: chloride ions; Mohr method; seawater.

Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco

RESUMO

A pesquisa objetivou analisar através de ensaios químicos, o quantitativo de íons cloretos em concretos de diferentes traços (proporção de materiais), em suas profundidades. Para tanto, foram realizados ensaios em laboratórios, sendo confeccionados corpos de prova com a parcial imersão em água do mar de acordo com as normas e método de Mohr. Com os resultados verificou-se que o percentual de penetração de íons cloreto é menor para o traço rico, em relação aos demais. Sendo assim, conclui-se que quanto maior a resistência do concreto, maior será a resistência à penetração de íons cloretos, porém estes resultados são esperados, pois o concreto com maior resistência e mesmos materiais tende a dificultar a entrada desses íons.

Palavras-chave: íons de cloro; método de Mohr; água do mar.

1. INTRODUCCIÓN

Desde inicios del siglo XX ya se tiene registros de uso del concreto armado en Brasil, pero el concreto en las construcciones tomó fuerza a partir de los años 50. Tal acontecimiento se dio por herencia de la revolución industrial que modificó técnicas y trajo nuevos materiales.

De acuerdo con Mehta y Monteiro (2014) el concreto solo es superado por el agua como material más consumido en el planeta. Por su resistencia y versatilidad formal el concreto además de desarrollar un papel importante en las construcciones civiles, ha sido ampliamente utilizado por los arquitectos en obras, por la posibilidad de formas, valorización estética de las estructuras y usos pudiendo ser vaciado dando margen a la creatividad, principalmente cuando es usado en obra limpia, sin revestimiento.

Con el pasar del tiempo las construcciones empezaron a presentar diversas manifestaciones patológicas que degradan y pueden causar hasta su colapso. Por eso hay necesidad de estudios e investigaciones sobre ese tema.

Entre las principales manifestaciones patológicas que atacan al concreto armado están la acción del calor o del frío, clima y humedad, reacción álcalis /agregado, agresividad química, corrosión por carbonatación y/o por cloruros (Cascudo et. al., 2014).

La penetración de iones cloruros afecta las construcciones en zonas costeras o cercanos al mar que poseen gran concentración de iones cloruros libres. Estos son considerados como la mayor causa de corrosión prematura de las estructuras. (Verás Ribeiro et al, 2014 y Medeiros, 2014)

Brasil posee varios equipamientos y construcciones que están en contacto directo o semidirecto con el mar. Recife, capital de Pernambuco, es una de las ciudades con más estructuras urbanas en contacto con agua de mar. Los edificios, puentes, fondeaderos, pasarelas, en fin, proyectos que determinan estructuras en concreto en ambiente marítimo: ambientes de zona sumergida, parcialmente sumergida, zona de marea, zona de salpicadura y zona de niebla. Las aguas del mar contienen una elevada cantidad de iones cloruros y esta exposición hace más vulnerable estas estructuras de concreto. (Pitan et. al., 2015)

Por lo tanto, se hace necesario la investigación y la construcción de parámetros y relaciones que permitan tomar decisiones sustentables y económicas de los proyectos y el aumento de la vida útil de las estructuras de concreto.

Esta investigación tiene como objetivo, a través de ensayos químicos determinar la penetración de cloruros en especímenes de concreto con diferentes proporciones de los materiales, caracterizados como: pobre, medio y rico; parcialmente sumergidos en agua de mar. Para eso, será utilizada la ISO TC 71/SC 1 como referencia a los procedimientos de penetración de cloruros y será utilizado el método de Mohr como referencia de los ensayos en laboratorio químico.

1.1 Ambiente marino

Según la NBR 6118:2014 el ambiente marino es reconocido por su agresividad a las estructuras de concreto, y donde está considerado como agresividad clase IV. La influencia de este en la durabilidad de las estructuras de concreto depende del microclima en el cual se encuentra (Cascardo et. al., 2014). Los agentes agresivos presentes en el ambiente marino provocan tanto la corrosión de las armaduras como la corrosión del concreto (matriz de cemento) (Lima y Morelli, 2004).

Según Andrade (2001) y Medeiros (2012) la penetración de cloruros del concreto puede ocurrir de modos diferentes, donde en primer lugar se trata la incorporación de cloruro a la masa de concreto, lo que viene tornando más improbable debido a las limitaciones impuestas por las normas vigentes. Como ejemplos de los otros mecanismos son los más usuales que son la absorción capilar y la difusión, que dependen de factores externos.

Según Verás Ribeiro et al (2014), la absorción capilar es un mecanismo donde los cloruros presentes en un medio líquido penetran al concreto a partir del flujo de este líquido, por el efecto de la tensión superficial actuante en los poros capilares. Según Verás Ribeiro et al (2014) y Meira (2009), este mecanismo depende del diámetro de los poros de la tensión superficial del líquido, de su densidad y de su viscosidad.

La difusión es un mecanismo que ocurre debido a gradientes de concentración de cloruros. Los cloruros en regiones de mayores concentraciones se mueven para regiones de concentración más baja (Meira, 2009).

En 2014 la NBR 6118, destaca un capítulo sobre el tema, donde se determina las clases de agresividad ambiental para construcciones de concreto en áreas urbanas o rurales, identificándolas como: débil, moderada, fuerte o muy fuerte.

Tal regulación ya informaría a los cuidados tanto del tipo de concreto, así como la especificación del recubrimiento de la armadura. El espesor nominal por adoptar de acuerdo con el componente o elemento de concreto armado o post tensado. La NBR 6118:2014 ya recomienda que el recubrimiento debe ser respetado en obras inclusive donde hay poco o ningún control, una vez que este es igual al recubrimiento mínimo más un factor de tolerancia.

La mayoría de las construcciones en contacto directo con el ambiente marino adquieren las manifestaciones patológicas en poco tiempo de construidas, con gran descomposición del concreto y elevada corrosión de las armaduras (Verás Ribeiro et al, 2014). El agua de mar posee elevada

cantidad de iones de cloruros. La clasificación entre ambientes agresivos y no agresivos es muy relativa y se refiere principalmente, a las concentraciones de H₂S, SO₂, NO_x, SO₄, Cl⁻ (Helene, 1986).

Para Medeiros (2014), esos óxidos son extremadamente agresivos y contribuyen, para acelerar el proceso de corrosión de las armaduras embebidas en concreto, aun cuando en pequeñas proporciones. Como referencia, se puede ver que la velocidad de corrosión en atmósfera marina puede ser en el orden de 30 a 40 veces superior al que ocurre en la atmósfera rural pura (Verás Ribeiro et al, 2014).

En ciudades que están sujetas a esa exposición salina, las construcciones de concreto o concreto armado aparente, tanto en contacto con agua de mar o no; es típico de los mares siempre causar manifestaciones patológicas y desgastes mecánicos que exigen permanente mantenimiento (Cascudo et. al, 2014).

Algunos proyectos determinan estructuras en concreto en ambiente marítimo: ambientes de zona sumergida y parcialmente sumergida en agua de mar, zona de marea alta y baja, zona de atmósfera, zona de salpique y zona de niebla (Cascudo et. al, 2014).

El agua de mar es uno de los elementos de la naturaleza que más causa daños a estructuras de concreto. En su composición es posible encontrar elementos componentes de ciertos componentes químicos.

Según Lima y Morelli (2005), los oceanógrafos identifican los elementos distribuidos en las aguas de los océanos, bien como sus diversos estados y componentes químicos. Algunos componentes son estables, como los que contienen sodio y potasio; y otros son relativamente bien estables, como los que contienen silicio y magnesio. El tamaño de la concentración puede ser determinada en 3 grupos:

- Elementos Inorgánicos Mayores - Cl, Na, S, Mg, Ca, K (son aquellos que se presentan en cantidades mayores de 100 partes por millón (ppm)), ó 100 mg por litro (mg/L) equivalente a 10% en peso.
- Elementos Menores - Br, C, Sr, B, Si, F (son aquellos que se presentan en cantidades mayores que 1 mg y menos que 100 mg/L, es decir de 0,1% a 10%)
- Elementos em menor concentración - N, Li, Rb, P, I, Fe, Zn, Mb (son aquellos que se presentan en cantidades menores que 0,1%).

La composición de agua de mar, que puede variar de acuerdo con la temperatura, la latitud, profundidad y aproximación al continente, ha sido pesquisada a lo largo de los tiempos. En el siglo 19, Dittmar en 1870, posterior al análisis de millares de muestras de agua de todos los mares, constató que sabiendo que, a pesar de la cantidad de variables de sales disueltas en total, las proporciones de los elementos principales son constantes. La salinidad varia de 3,3% a 3,7% en océano abierto; siendo el promedio general de salinidad para todos los mares de 3,5%.

1.2 La ciudad de Recife y el contacto con el mar

Recife la capital Pernambucana es conocida como la Venecia Brasileña debido a sus construcciones junto a los ríos y el mar, puentes que colocan su paisaje urbano, siendo una de las ciudades que más posee equipamientos urbanos en contacto con agua de mar. La Fig. 1 se tiene una vista panorámica del municipio de Recife.

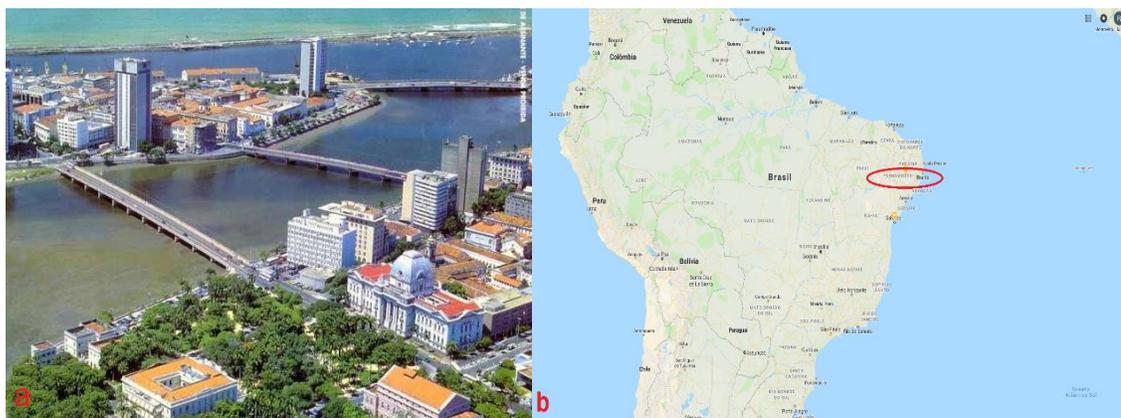


Figura 1. a) Vista panorámica de Recife /Pe. Fuente: Google Maps (2017) Disponible en: <<http://embrasil.s3.amazonaws.com/upload/ciudad/81C-37.jpg>>. Acceso el: 11/07/2017.
b) Vista del mapa de Brasil, destacando Recife, Pernambuco.

Recife por ser una ciudad litoral de clima caliente humedad alta y predominancia de los vientos que vienen en dirección del océano atlántico sufre, en sus estructuras de concreto agresiones de agentes de las manifestaciones patológicas de diversos tipos. De acuerdo con la NBR 6118:2014, Lima, Morelli (2004), Verás Ribeiro et al (2014) y Medeiros (2014) clasificaron y definieron cuatro zonas de agresividad que se ubican bien a lo que sucede en las estructuras de concreto existentes en la ciudad. Tales regiones son:

- Zona de atmósfera marina: en esta región la estructura recibe, a pesar de no estar en contacto con el agua de mar, una cantidad razonable de sales, principalmente el cloruro, capaz de producir depósitos salinos en la superficie en forma de partículas sólidas o como gotas de solución salina. La cantidad de sales presente va disminuyendo en función de la distancia del mar, sufriendo la influencia de la velocidad y dirección de los vientos predominantes. El mecanismo principal de degradación presente en esta zona es la corrosión de las armaduras por la acción dos iones cloruro;
- Zona de salpique: es la región donde ocurre la acción directa del mar, debido a las olas y los salpiques. Los daños más significativos son producidos por corrosión de las armaduras por iones cloruro y por la erosión, debido a las olas.
- Zona de variación de mareas: esta región está limitada por los niveles máximos y mínimos alcanzados por las mareas y debido a eso el concreto puede encontrarse casi siempre saturado, dependiendo de las condiciones climatológicas y con una creciente concentración de sales. La degradación ocurre debido a la acción de las sales agresivas (ataque químico), corrosión de armaduras (debido a la presencia de iones cloruros), acción de las olas y otras sustancias en suspensión (abrasión) y microorganismos.
- Zona sumergida: el concreto en esta región se encuentra permanentemente sumergido. La degradación ocurre por la acción de sales agresivas (iones sulfato y magnesio) y por la acción de microorganismos que, en casos extremos, puede generar la corrosión biológica de las armaduras.

1.3 Método de Mohr

La necesidad de identificar como ocurre la penetración de cloruros en estructuras de concreto armado se hace necesaria pues es ella quien posteriormente provoca la corrosión. Varios métodos han sido desarrollados como tal entre ellos el método colorimétrico de rociado de nitrato de plata, que es un ensayo cualitativo de identificación de cloruros libres en concretos es el método de Mohr usado en laboratorio que utiliza la titulación también con nitrato de plata.

De acuerdo con Mota (2011), el método colorimétrico de rociado por nitrato de plata usa la metodología basada en la aplicación de un indicador químico capaz de alterar la coloración del concreto en presencia de cloruros. Este presenta variables, según estudios de los investigadores Otsuki, Andrade y Meck, como tipo de cemento, relación agua / cemento y tipo de material utilizado, como se muestra en la Tabla 1.

Ese método fue desarrollado en 1970 por el Dr. Mário Collepari con intención de verificar en muestras de concreto la existencia o no de cloruros y así poder determinar el frente de penetración de cloruros en estructuras expuestas a ambientes marinos. Esta técnica contribuye también para la determinación del proceso de fijación de los cloruros libres en la matriz cementícea (MOTA,2011). Para la realización del método de MOHR se utiliza en las muestras de concreto primero la solución de K_2CrO_4 al 5% (cromato de potasio), que funciona como indicador, pigmentando de amarillo y posteriormente se gotea con medición la solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) 0,0141M hasta que la muestra líquida obtenga la coloración “anaranjada” para hacer la titulación y entender la combinación de los iones libres de la muestra de concreto.

Tabla 1. Resumen de algunas variables involucradas en las pesquisas del método colorimétrico de riego de nitrato de plata.

Tipo de Cemento	Tipos de CP's	a/c	Concentración de Cloruros Limite para cambio de color	Año	País	Investigador
Cemento Portland Común	Pasta	0,4	0,15%	1992	Japón	Otsuki et.
	Mortero	0,5 e				
	Concreto	0,6				
Cemento Portland Común y Cemento Portland con adición	Concreto	0,4 e 0,7	1,13 a 1,4%	1999	España	Andrade et.
Cemento Portland Común y Cemento Portland con adición	Concreto	-	0,90%	2003	Australia	Meck

Fuente: Mota (2011).

1.4 Estandarización: ISO TC71/SC 1(26-07-2010) E ISO/WD 1920-11

Según esta ISO las estructuras de concreto armado expuestas al ingreso de cloruros, sea de aguas marinas o de otras fuentes, deben atender a criterios de durabilidad para los cuales fueron proyectadas, por al menos todo el tiempo de vida útil del proyecto. La posibilidad de ocurrencia de corrosión en las armaduras aumenta significativamente en la medida que la concentración de cloruro paulatinamente se acumula en el interior de esas estructuras. Por esa razón el grado de difusión o penetrabilidad del concreto representan importantes propiedades a ser evaluadas, al paso en que estas especificaciones técnicas establecen un método de ensayo que puede ser aplicado a muestras preparadas para la evaluación de las propiedades potenciales de resistencia al cloruro que una dada mezcla de concreto pueda presentar.

Esas especificaciones técnicas representan un método para determinar los parámetros de penetración unidireccionales del cloruro en estado no continuo en probetas de concreto endurecido pre acondicionados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación tiene como finalidad determinar cuantitativamente la penetración de cloruros en probetas de diferentes resistencias, en variadas profundidades.

Para eso, fueron realizados ensayos en Laboratorios de la Universidad Católica de Pernambuco. en el Laboratorio de Materiales fueron confeccionadas las probetas usando ensayos con inmersión parcial en agua de mar y como referencia de los procesos las ISO TC 71/SC 1 de 26/07/2010, ISO/WD 1920-1, ISO TC 71/SC 1/WG SII NBR-9779. Seguidamente en el Laboratorio de Química fue realizado el método de Mohr.

Para el cálculo del porcentaje de cloruro absorbido por las muestras, fue utilizada la ecuación 1 abajo:

Por tratarse de material considerado “inerte” los agregados, no son tomados en cuenta para los cálculos, solo el peso del cemento. Pues llevando en consideración el hecho de que los componentes químicos presentes en el cemento son los que reaccionan con los cloruros, en especial el C₃A.

$$\frac{mg}{L} Cl^- = \frac{(V1 - V2) \times m \times mm \times 1000}{V_{\text{amostra}} \times \text{factor de dilución}} \quad (1)$$

Donde:

- V1 = volumen de la solución de AgNO₃ consumido para titular la muestra, en ml
- V2 = volumen de la solución de AgNO₃ consumido para titular el blanco, en ml
- m = concentración molar de la solución de AgNO₃
- mm = peso molar de Cl
- V muestra = 0,10 ml
- Factor de dilución = 1000/250 = 4

2.1 Caracterización de los materiales utilizados

- **Cemento:** El utilizado en esta investigación fue el CP II-F-32, nombrado según la ABNT de Cemento Portland compuesto con filler (NBR 11578/91).
- **Arena gruesa:** El agregado fino utilizado en esta investigación es natural de lecho de río, proveniente de la ciudad de Pombos, Pernambuco. La arena fue ensayada en el laboratorio de materiales siguiendo las normas de caracterización y distribución granulométrica.
- **Piedra:** El agregado grueso utilizado fue una piedra de dimensión 25 mm, gradación 1 de acuerdo con la NBR 7211 (ABNT, 2009).
- **Agua potable:** Fue utilizada el agua proveniente de la red de abastecimiento público de la ciudad de Recife, COMPESA.
- **Agua del mar:** El agua de mar utilizada fue de playa de Boa Viagem, Recife, Pernambuco.

2.2 Vaciados de las probetas

Fueron vaciadas nueve probetas cilíndricas (10 x 20 cm) de concreto (Ver Tabla2) para tres resistencias mecánicas diferentes, baja, promedio y alta, siendo tres de cada una. Posterior al desencofrado todas las probetas fueron sometidas a curado húmedo por 14 días. Uno de cada dosis permaneció en curado húmedo hasta los 28 días para poder mantener un patrón sobre todos y evaluar sus resistencias mecánicas.

Las otras seis probetas fueron divididas a la mitad de su altura, rectificando los bordes y permanecieron en ambiente seco por más de 14 días, resultando un total de 12 probetas de 10 x 10 cm. A los 21 días éstas fueron impermeabilizadas en su alrededor, dejando solos las tapas originales y rectificadas, como se muestra en la Figura 2. Con 28 días de edad fueron sumergidos en agua

potable, quedando hasta los 35 días donde fueron retirados y colocados parcialmente sumergidos en agua de mar, con el tope sobre fina cama de arena por 7 días más, de acuerdo con la Figura 3. A los 42 días se retiró del agua de mar, se dejó secar por 24 horas en ambiente natural e identificó cada una de las probetas: por el tipo de dosificación y por la división hecha. La Tabla 2 muestra una tendencia unitaria con las debidas proporciones de materiales en peso en relación con el peso del cemento de los materiales utilizados. Para tanto fueron mantenidos fijos los revenimientos en 160 ± 20 (mm), con la variación de los materiales secos.

Tabla 2. Mezclas de Concreto (unitario)

Tipo	Proporción	Revenimiento	a/c	Cemento	arena	grava	Resistencia Promedio (MPa)
Pobre	1:3	160 ± 20	0,516	1	1,6	1,40	26,67
Medio	1:2	160 ± 20	0,370	1	0,95	1,05	32,33
Rico	1:1	160 ± 20	0,259	1	0,3	0,70	40,87

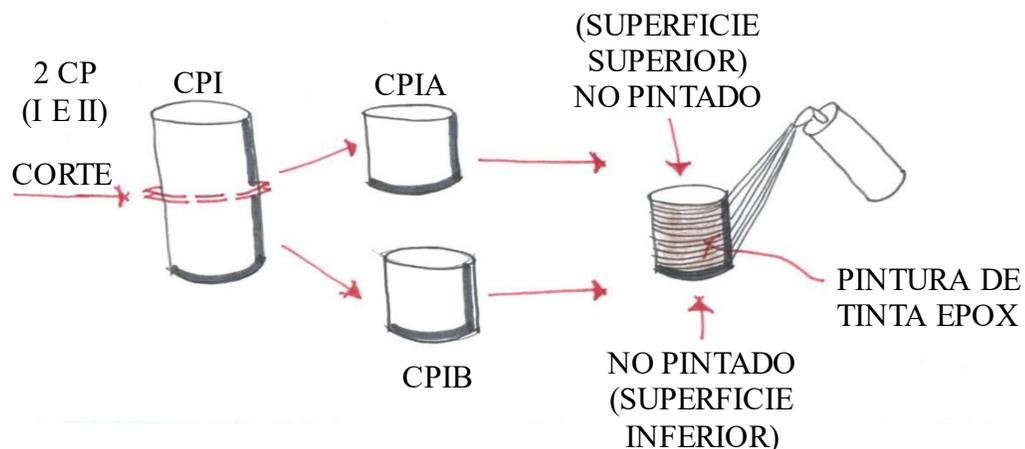


Figura 2. Proceso de cortar nombrar y pintar los CP (probetas).

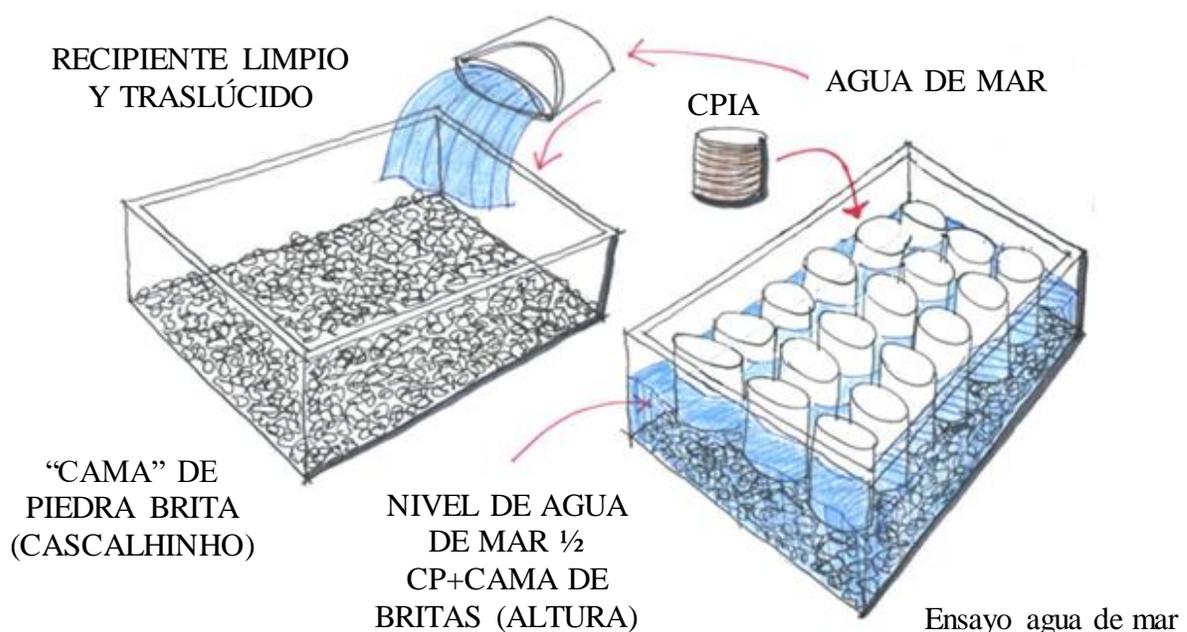


Figura 3. Ensayo con agua de mar (dibujo esquemático).

Posterior a todos esos procesos fueron realizados huecos en cada probeta. Fueron hechos en la extremidad que estuvo en contacto con el agua de mar y fueron perforados de mayor a menor perforación y con profundidades de 1, 2, y 3 centímetros en este orden. Para la perforación fue utilizado el taladro de impacto, regla de medición, taladro de banco para que hubiese mayor precisión y brocas para concreto de 14, 10, 8 mm. A cada perforación todo material fue recogido (polvo) y acondicionado en bolsas individuales nombrados y enumerados para su identificación cuando fuesen ensayados en el laboratorio químico (ver Figura 4).



Figura 4. Ensayos de perforación con taladro fijo.

2.3 Realización del método de Mohr

La segunda parte de la investigación fue realizada en el laboratorio químico de la Universidad Católica de Pernambuco, con la orientación del profesor Sérgio Paiva. La intención de los ensayos fue utilizar el método de Mohr como titulación por nitrato de plata, para que fuese determinada la cantidad de iones cloruro penetrados en las diferentes profundidades perforadas de las probetas de 1, 2, 3 cm y colectada en las 45 muestras.

En la Tabla 3 se observa que fueron catalogadas 45 muestras, 36 de las probetas parcialmente sumergidas y 9 de las no sumergidas, siguieron en los ensayos.

Tabla 3. Probetas de prueba 45 muestras

Tipo	Proporción	CPs (10X10)	Perforación (3 p/CP)
Pobre	1:3	4	12
Medio	1:2	4	12
Rico	1:1	4	12
Sin Inmersión	-	03 (10x20)	9
Total de Muestras			45

Fueron colocados en vasos de precipitados parte de las 45 muestras, y se pesaron 0,5 gramos. Posterior a eso se colocó para cada muestra el polvo de la perforación de una probeta, partes A y B (las dos partes de 10 cm x10 cm) en tres Erlenmeyer, y, por lo tanto, enumerando de 1 a 18 y se acondicionó con una pipeta 50ml de agua destilada (sin sales) agitando para mezclar.

Luego ese “polvo” pesado fue diluido con agua destilada en balón volumétrico de 250 ml. Se espero al menos de 24hs, para reposar y posteriormente se diluyó el contenido de los balones volumétricos con agua destilada hasta 250 ml, agitándolos individualmente para homogeneizar.

De estos 250 ml, fueron retirados y colocados en Erlenmeyer tres muestras con 10 ml cada una. En cada una de estas muestras se colocó 1ml de cromato de potasio (K_2CrO_4 , 5%, con un grado de pureza de 99%) que funcionó como indicador y dejando una coloración amarilla. Posterior a esto cada muestra recibió gotas de nitrato de plata ($AgNO_3$ – 0,0141 mol/l, con una pureza de 97,8%) para titular (coloración rojo teja), es decir observar la cantidad de nitrato de plata necesaria para asociarse a los iones de cloruros libres en la masa de cemento de cada muestra.

Los resultados son colocados individualmente por proporción en planillas y se calcula la cantidad de iones de cloruro en cada muestra que reaccionó con la masa de cemento de acuerdo con la proporción (pobre, medio y rica) y la profundidad de penetración (1, 2 y 3 centímetros). Con la Fig. 5, se entiende mejor el proceso.

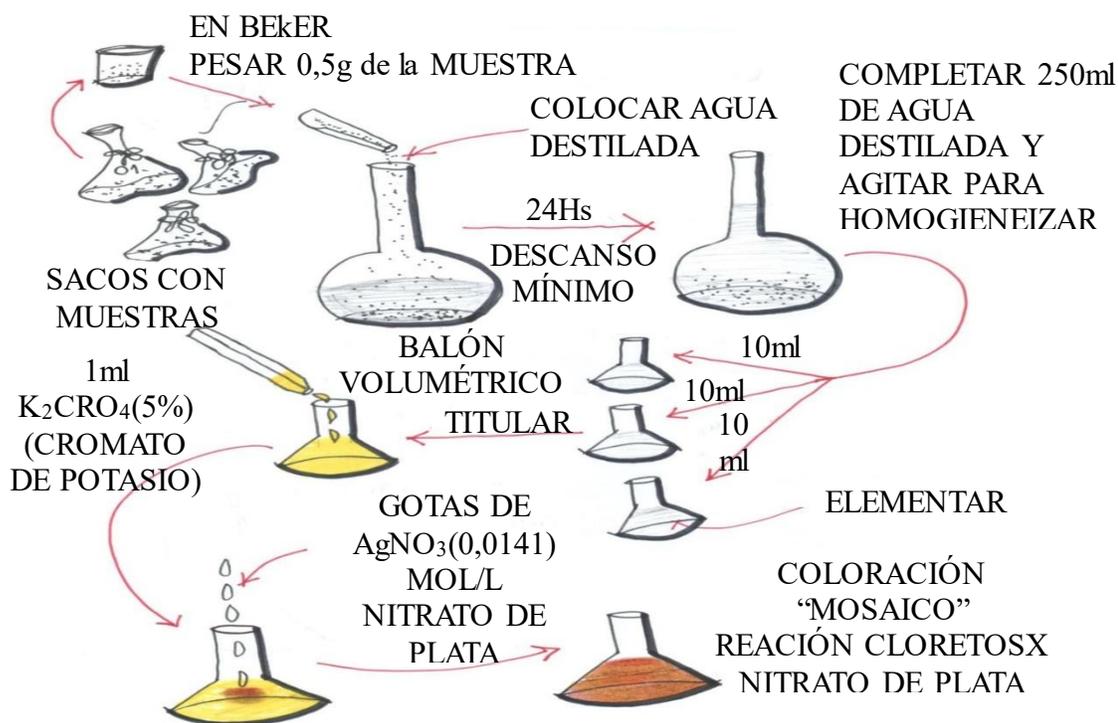


Figura 5. Esquema de los ensayos realizados en laboratorio de química

3. RESULTADOS

En este capítulo serán presentados los resultados y los análisis de los ensayos desarrollados por la titulación con nitrato de plata utilizando el método de Mohr.

En primer lugar, se presentan las Tablas 4, 5 y 6 con los pesos de las identificaciones de las muestras los volúmenes consumidos de $AgNO_3$ (nitrato de plata), por muestra (pobre, medio y rico) la relación entre los tres la relación entre el pobre con el rico y la relación del medio con el rico.

Las tablas 6, 7 y 8 muestran los resultados obtenidos de las muestras de polvo retirados por la profundidad de perforación de cada probeta de cada proporción, resultados de laboratorio de titulación por nitrato de plata y porcentajes de cloruros en relación con la masa de cemento. Como los pesos de las muestras tenían variaciones fueron hechas tres titulaciones con el nitrato de plata consumido y para que el margen de error fuese menor, fue hecho el promedio aritmético de estas.

En ellos se observa que la profundidad de un centímetro perforado en muestra, para todas las proporciones, tiene la mayor concentración de cloruros, por estar más cerca de las extremidades.

Tabla 4. Resultados de los ensayos realizados en el laboratorio químico – Muestras de probetas de proporción pobre con inmersión en agua de mar.

CP	TIPO DE PROPORCIÓN	PROF. (cm)	MUESTRA N°	PESO (g)	AgNO ₃ (ml) (Consumido)				CLORURO (%Cl ⁻) relación masa cemento
					1ª Tit.	2ª Tit.	3ª Tit.	Promedio	
PROPORCIÓN POBRE - TP									
1	CP 1A	1	1	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		2	2	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		3	3	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0292
2	CP 1B	1	4	0,51	0,60	0,60	0,70	0,63	0,0311
		2	5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		3	6	0,52	0,70	0,50	0,50	0,57	0,0273
3	CP IIC	1	7	0,50	0,50	0,40	0,60	0,50	0,0234
		2	8	0,50	0,50	0,40	0,40	0,43	0,0195
		3	9	0,51	0,30	0,40	0,30	0,33	0,0136
4	CP IID	1	10	0,54	0,70	0,60	0,60	0,63	0,0311
		2	11	0,52	0,40	0,40	0,50	0,43	0,0195
		3	12	0,50	0,30	0,40	0,30	0,33	0,0136

*CP 1A, CP 1B, CP IIC, CP IID – Identificación de las Probetas de TP - Proporción Pobre.

Tabla 5. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio químico – Muestras de probetas de proporción media con inmersión en agua de mar

CP	TIPO DE PROPORCIÓN	PROF. (cm)	MUESTRA N°	PESO (g)	AgNO ₃ (ml) (Consumido)				CLORURO (%Cl ⁻) relación masa cemento
					1ª Tit.	2ª Tit.	3ª Tit.	Promedio	
PROPORCIÓN MEDIO - TM									
5	CP IIIE	1	13	0,55	0,70	0,70	0,80	0,73	0,0272
		2	14	0,54	0,60	0,50	0,40	0,50	0,0172
		3	15	0,55	0,50	0,60	0,50	0,53	0,0186
6	CP IIIF	1	16	0,52	0,50	0,60	0,50	0,53	0,0186
		2	17	0,56	0,60	0,40	0,50	0,50	0,0172
		3	18	0,56	0,40	0,40	0,30	0,37	0,0114
7	CP IVG	1	19	0,56	0,80	0,60	0,80	0,73	0,0272
		2	20	0,58	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0214
		3	21	0,57	0,40	0,50	0,60	0,50	0,0172
8	CP IVH	1	22	0,63	0,80	0,70	0,80	0,77	0,0286
		2	23	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0172
		3	24	0,56	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0114

*CP IIIE, CP IIIF, CP IVG, CP IVH – Identificación de las Probetas de TM - Proporción Medio.

Tabla 6. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio químico – Muestras de probetas de proporción rico con inmersión en agua de mar.

CP	TIPO DE PROPORCIÓN	PROF. (cm)	MUESTRA N°	PESO (g)	AgNO ₃ (ml) (Consumido)				CLORURO (%Cl ⁻) relación masa cemento
					1 ^a Tit.	2 ^a Tit.	3 ^a Tit.	Promedio	
PROPORCIÓN MEDIO - TM									
9	CP VI	1	25	0,53	0,80	0,70	0,50	0,67	0,0161
		2	26	0,52	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0076
		3	27	0,55	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0076
10	CP VJ	1	28	0,52	0,70	0,60	0,70	0,67	0,0161
		2	29	0,50	0,50	0,60	0,60	0,57	0,0132
		3	30	0,52	0,50	0,60	0,60	0,57	0,0132
11	CP VIL	1	31	0,50	0,70	0,70	0,50	0,63	0,0151
		2	32	0,56	0,60	0,50	0,50	0,53	0,0123
		3	33	0,53	0,60	0,60	0,70	0,63	0,0151
12	CP VIM	1	34	0,52	0,70	0,50	0,50	0,57	0,0132
		2	35	0,54	0,40	0,50	0,50	0,47	0,0104
		3	36	0,53	0,30	0,30	0,40	0,33	0,0066

*CP VI, CP VJ, CP VIL, CP VIM – Identificación de Probetas de TM - Proporción Medio.

Tabla 7. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio químico – Muestras de probetas de proporción rico, medio y pobre sin inmersión en agua de mar.

CP	TIPO DE PROPORCIÓN	PROF. (cm)	MUESTRA N°	PESO (g)	AgNO ₃ (ml) (Consumido)				(%Cl ⁻) relación masa cemento	(%Cl ⁻) relación masa cemento
					1 ^a Tit.	2 ^a Tit.	3 ^a Tit.	Promedio		
PROPORCIÓN POBRE C P S/IMER										
13	CP VII	1	37	0,5	0,4	0,3	0,4	0,37	0,0033	0,0156
		2	38	0,5	0,3	0,3	0,4	0,33	0,0029	0,0136
		3	39	0,54	0,4	0,3	0,4	0,37	0,0033	0,0156
PROPORCIÓN MEDIO C P S/IMER										
14	CP VIII	1	40	0,55	0,4	0,5	0,3	0,4	0,0037	0,0129
		2	41	0,54	0,4	0,4	0,5	0,43	0,0042	0,0143
		3	42	0,56	0,4	0,5	0,4	0,43	0,0042	0,0143
PROPORCIÓN RICO C P S/IMER										
15	CP IX	1	43	0,53	0,3	0,3	0,4	0,33	0,0029	0,0066
		2	44	0,53	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0037	0,0085
		3	45	0,54	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0037	0,0085
AGUA De MAR ATLÁNTICO SUL										
16	AMOS-TRA		46						-0,0012	

Posterior a la aplicación de fórmula fue encontrado el porcentaje de cloruros en relación con peso de concreto. La masa de cemento es el indicador del análisis de la penetración de los cloruros, fue encontrada a partir del consumo de cemento utilizado para las muestras donde la proporción pobre

consume 503 kg/m³ de concreto y la proporción medio 685 kg/m³ es un peso específico de concreto de 2.350 kg/m³, permitió la obtención del porcentaje de cloruro en masa de cemento. Con todos los porcentajes encontrados, fue calculado un promedio aritmético dando origen a la Tabla 8.

Tabla 8. Relación peso concreto (%Cl) en probetas

Proporción	Profundidad					
	Con inmersión			Sin inmersión		
	1 cm	2 cm	3 cm	1 cm	2 cm	3 cm
Pobre	0,0273	0,0214	0,0209	0,0156	0,0136	0,0156
Medio	0,0254	0,0182	0,0147	0,0129	0,0143	0,0143
Rico	0,0151	0,0109	0,0106	0,0066	0,0085	0,0085

De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorios, a través del experimento citados, destacamos las siguientes consideraciones que: La técnica utilizada se trata de una técnica cualitativa, esta técnica tiene bajo costo y de manera rápida nos proporciona cualitativamente si existen cloruros libres, dando subsidio para aplicación de otras técnicas más refinadas cuantitativamente. Por otro lado, es importante destacar, que existen limitaciones para la técnica, un caso clásico, cuando la estructura está carbonatada, siendo sus resultados confundidos.

4. CONCLUSIONES

Los resultados nos muestran que la penetración de cloruro es menor en probetas de concreto parcialmente sumergidas en agua de mar siguiendo este orden:

- Proporción rico
- Proporción medio
- Proporción pobre

En todas las proporciones que fueron parcialmente sumergidos, la penetración de cloruros fue mayor con profundidad de 1 cm. Las probetas no sumergidas en agua de mar presentaron presencia, en promedio menor que 50% de cloruros de lo que los parcialmente sumergidos.

Se puede concluir que las estructuras de concreto que están parcialmente inmersas en agua de mar necesitan de un cuidado especial en su proyecto (proporción, recubrimiento, pintura protectora) así como mantenimientos periódicos para su vida útil y posibles colapsos.

Ante este levantamiento se obtuvo resultados de profundidad y de penetración de cloruros para proporciones: rico medio y pobre lo que debe ayudar a los profesionales a trazar parámetros para que se pueda aumentar la vida útil de construcciones en contacto con la agresividad ambiental. Es importante el cuidado con los materiales a ser usados, direccionando el tipo de cemento, resistencia para el concreto que desarrollen actividades en contacto parcial con agua de mar en la región metropolitana de Recife o en otra ciudad con atmósfera marina.

A partir de los ensayos realizados, se puede concluir que cuanto mayor es la resistencia del concreto, mayor será su resistencia a la penetración de iones cloruros mantenidos los mismos materiales de proporción.

Para tanto se sabe que, al depender de los componentes químicos existentes en los cementos y sus respectivas fases, tendrán una influencia significativa en la capacidad de combinarse químicamente (combinarse) con los cloruros. Las fases de los aluminatos (C₃A y C₄AF), son las fases que se combinan químicamente con los cloruros formando los cloro aluminatos, por otro lado, las fases principales responsables por la generación del gel C-S-H, son C₃S y C₂S, y con consecuencias en sus hidrataciones generaciones resistencias a compresión. Por tanto, hay una mayor influencia

sobre componentes del cemento en su capacidad de combinarse químicamente con los cloruros de lo que la resistencia a compresión.

Ese resultado ya era esperado porque mientras mayor es la resistencia del concreto menor es la cantidad de poros, aumentando la dificultad de penetración de iones cloruros. Este estudio de caso tuvo como objetivo comparar muestras de concreto con diferentes concentraciones de cemento en su composición en relación con la penetración de cloruros cuando son sumergidos o no en agua de mar.

Con el resultado fue concluido que los concretos con mayores resistencias (factor agua cemento menor) tiene una resistencia mayor a la penetración de los iones cloruros, teniendo en cuenta que este resultado es esperado, pues el concreto con mayor resistencia tiene los poros más reducidos, dificultando así la entrada de los iones cloruros en ese tipo de estructura. Es importante destacar que tales concretos estudiados en esta investigación, pueden ser utilizados en refuerzos estructurales.

5. REFERENCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 7211/2009: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118/2014: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991), *NBR 11578/91: cimento Portland composto - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR-9779/2012: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Andrade, C., Sagrera, J. L., Sanjuán, M. A. (1999), “Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water”, In: 2nd International Rilem Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Eds. C. Andrade, J. Kropp, Paris, CD.
- Andrade, J. J. O. (2001), Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 249 p.
- Cascudo, O., Carasek, H. (2014), *Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo, SP: IBRACON.
- Google Maps (2017). Disponível em: <http://embrasil.s3.amazonaws.com/upload/ciudad/81C-37.jpg>. Acesso em: 11/07/2017
- Helene, P. R. L. (1986), *Corrosão das Armaduras para Concreto Armado*. São Paulo, IPT, PINI.
- Helene, P., Medeiros, M. (2008), *Concreto armado versus ambiente marítimo: por que proteger e o que considerar para especificar?*. São Paulo, Concreto e Construções, IBRACON, v.35, p.23-8.
- International Organization for Standardization (2013), *ISO TC 71/SC 1 - Testing methods for Concrete*.
- International Organization for Standardization (2013), *ISO/WD 1920-11 - Testing of Concrete - part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion*.
- Lima, M. G., Morelli, F. (2005), *Mapa brasileiro de "chuva dirigida" - Algumas considerações*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo, SP: IBRACON. pp: 751.
- Meira, G. R. (2009), *Comportamento do aerosol marinho e sua relação com estruturas de concreto em zona de atmosfera marinha*. In: Jornadas de Engenharia - Tecnologia do Concreto e Patologia

- das Estruturas, 2009, Fortaleza. Anais das Jornadas de Engenharia - Tecnologia do Concreto e Patologia das Estruturas. Fortaleza: UVA / UNIFOR. v. 1.
- Mota, A. C. M. (2011), *Avaliação da presença de cloretos livres em argamassa através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco.
- Medeiros, M. H. F., Real, L. V., Richter, K., Souza, W. B., Klein, N. S. (2014), *Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície*. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 8, p. 54-63. <https://doi.org/10.5216/reec.v8i2.27155>
- Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Borba, A. Y., Helene, P. (2012), *Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas*. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v. 65, p. 475-481. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672012000400007>
- Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P. (2012), *Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloretos e absorção de água*. Revista ALCONPAT, v. 2, n. 3, p. 156-161. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.34>
- Meck, E., Sirivivatnanon, V. (2003), *Field indicator of chloride penetration depth*. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 8, p.1113-1117. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00012-7)
- Otsuki, N., Nagataki, S., Nakashita, K. (1992), *Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials*. ACI Materials Journal, v. 8, n. 6, p. 587-592, 1992. Technical paper.
- Pintan, N. M., Berenguer, R. A., Da Costa E Silva, A. J., Lins, C. M. M. S., Monteiro, E. C. B. (2015), *Pathological Manifestations and The Study of Corrosion Present on Bridges on the City of Recife*. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 20, p. 11893-11907.
- Verás Ribeiro, D., Sales, A., Caldas de Sousa, C. A., do Couto Rosa Almeida, F., Teixeira Cunha, M. P., Zita Lourenço, M., Helene, P. (2014), *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise*. Rio de Janeiro: Campus.

Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS

C. F. Ferreira^{1*} , C. M. Paliga¹ , A. S. Torres¹ 

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

Recepción: 18/09/2017 | Aceptación: 26/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo verificar la compatibilidad de un modelo de expectativa de vida útil existente con la penetración de cloruros en elementos de concreto expuestos en la ciudad de Pelotas / RS. Para hacer esto, los cuerpos de prueba fueron expuestos en diferentes partes de la ciudad por un período de 16 meses, aplicando la solución de nitrato de plata para determinar la profundidad de los cloruros. El modelo de Bob (1996) fue utilizado para la comparación y el análisis de los resultados. Se encontraron valores significativos de cloruro en los elementos y potencialidad de aplicación del modelo en describir el comportamiento de la profundidad de los cloruros a lo largo del tiempo, a pesar de las diferencias encontradas.

Palabras clave: conservación; estructuras de hormigón; cloruros; ensayo natural; modelos de previsión.

Citar como: C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres (2018), “Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 123 - 137, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

¹ Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Evaluation of the penetration of chlorides in concrete elements in the city of Pelotas / RS

ABSTRACT

This research aims to verify the compatibility of an existing predictive model of life with the penetration of chlorides in exposed concrete elements in the city of Pelotas / RS. To this end, the samples were exposed at different locations in the city for a period of 16 months and silver nitrate solution was applied to determine the depth of the chlorides. The Bob model (1996) was used for comparison and analysis of the results. Significant values of chloride were found in the elements and a great potential of the model applied when describing the behavior of the depth of chlorides over time, despite the differences found.

Keywords: conservation; concrete structures; chlorides; natural test; prediction models.

Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a compatibilidade de um modelo de previsão de vida útil existente com a penetração de cloretos em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova em diferentes locais da cidade por um período de 16 meses, sendo aplicada a solução de nitrato de prata para determinação da profundidade de cloretos. Foi utilizado o modelo de Bob (1996), para comparação e análise dos resultados. Foram encontrados valores significativos de cloreto nos elementos e um potencial do modelo aplicado em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo, apesar das diferenças encontradas.

Palavras-chave: conservação; estruturas de concreto; cloretos; ensaio natural; modelos de previsão.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material de amplio uso aplicado mundialmente en las construcciones, debido a ventajas como buena resistencia a la compresión, bajo costo y facilidad de producción. Esta última característica en conjunto con el desempeño está directamente ligada a la vida útil de la edificación, que puede ser definida como el período en el cual la estructura es capaz de garantizar no apenas su estabilidad, más todas las funciones para las cuales fue proyectada (Bertolini, 2010). La degradación de las estructuras de hormigón y su consecuente reducción de desempeño es un problema frecuente en el mundo. Los problemas de durabilidad en estas estructuras pueden ser causados por diversos factores que incluyen la falta de conocimiento del medio ambiente a la que estarán expuestas, especificaciones inadecuadas y/o mala ejecución.

El ambiente en que las estructuras estarán expuestas ejerce influencia directa en el comportamiento del material utilizado. En este sentido la década del 90 mostró que el hormigón como material de construcción es inestable a lo largo del tiempo, teniendo sus propiedades físicas y químicas alteradas en función de las características de sus componentes y de las respuestas de estos a las condicionantes del medio ambiente (Souza e Ripper, 2009).

La forma de deterioro que ha mostrado mayor incidencia y con los mayores perjuicios económicos en diversos países es la corrosión de armaduras (Carmona, 2005). Este mecanismo de deterioro es

consecuencia de la interacción del material con el medio, aliada o no a esfuerzos mecánicos (Gentil, 2003). Uno de los principales agentes agresivos que pueden generar este proceso de deterioro son los iones cloruro (Helene, 1997). La corrosión ocasionada debido a la penetración de estos iones al interior del hormigón es de naturaleza electroquímica, envolviendo una reacción anódica donde ocurre la oxidación del metal, y otra de naturaleza catódica, que ocurren simultáneamente. Para que ocurra la corrosión de las armaduras de acero, se hace necesario la presencia de cuatro elementos: el conductor que es la propia barra de acero, el electrolito (agua) para conducir los iones, el oxígeno que forma los productos de corrosión y una diferencia de potencial para la formación de dos áreas distintas (la de naturaleza anódica y catódica). Este último factor puede ser ocasionado por diferentes intensidades de compacidad del hormigón, diferencias de aireaciones, de humedad o de concentraciones salinas (Silva, 2006).

La frecuencia que está ocurriendo la corrosión de armaduras y los problemas asociados a esta evidencian la necesidad de buscar soluciones que contribuyan para minimizar este proceso de deterioro y su evolución en las estructuras de hormigón armado (Vieira, 2003). Modelos de previsión de vida útil desarrollan un importante papel tanto en el auxilio de estructuras ya existentes, evaluando el deterioro de éstas, cuanto en nuevas construcciones, colaborando en la etapa de proyecto, para que en conformidad con el ambiente en que serán expuestas, estas tengan la vida útil esperada. Es de fundamental importancia también, que la aplicación de los modelos de previsión de vida útil esté asociada con la degradación natural de la estructura, donde ocurre la real interacción de ésta con el medio en que está expuesta.

A partir de lo mencionado, este estudio tuvo como objetivo verificar la compatibilidad del modelo de previsión de vida útil, existente en la literatura, con la penetración de cloruros en elementos de hormigón, expuestos en ambiente urbano de la ciudad de Pelotas/RS.

2. PROCEDIMIENTO

La metodología de este trabajo se dividió en dos etapas. La primera se refiere al ensayo natural, a través de la exposición de probetas de hormigón en diferentes locales de la ciudad de Pelotas/RS. La segunda etapa se basa en la aplicación de un modelo de previsión de vida útil y posteriormente la comparación de los resultados con los valores encontrados en exposición natural de las muestras.

2.1 Ensayo natural

2.1.1 Exposición de las probetas

Para la realización de este trabajo fueron utilizados 60 probetas (10 x 20 cm) de hormigón, que fueron provistos por una constructora local como forma de simular un hormigón real utilizado na ciudad y su interacción con el ambiente. Las muestras fueron confeccionadas con relación agua/cemento de 0,6 cemento CP IV - 32 de marca Votoran (cemento más usual en la región) y resistencia a la compresión (f_{ck}) de 20MPa (valor mínimo considerado para un hormigón estructural de acuerdo NBR 6118).

La ciudad de Pelotas/RS se encuentra apartada aproximadamente a 60km de la región marítima, y está localizada a las márgenes del canal San Gonzalo que comunica las Lagunas de los Patos y Mirim. Así las muestras fueron expuestas en ambiente urbano con humedad relativa anual superior a 70% y desprotegidas de la acción del ambiente (temperatura y agua de lluvia), pudiendo ser clasificada como C3 según la NTF 4015 (Norma Técnica Fondonorma, 2012). Puntos estratégicos de la ciudad fueron determinados, debido a la mayor circulación de vehículos y mayor concentración de urbanizaciones. La elección de los locales que representan cada región fue influenciada por la facilidad de acceso, además de la disponibilidad de espacio físico debido al gran número de probetas que serían colocados en cada local. Así las probetas fueron divididas en cinco diferentes locales de la ciudad, siendo estos: urbanización centro, urbanización Porto, urbanización

Fragata y urbanización Tres Vendas (debido a su extensión, para esta última urbanización fueron escogidos dos locales para la exposición de las probetas). Así, fueron colocados 12 probetas en cada localidad. La Figura 1 presenta la localización de los diferentes puntos analizados.

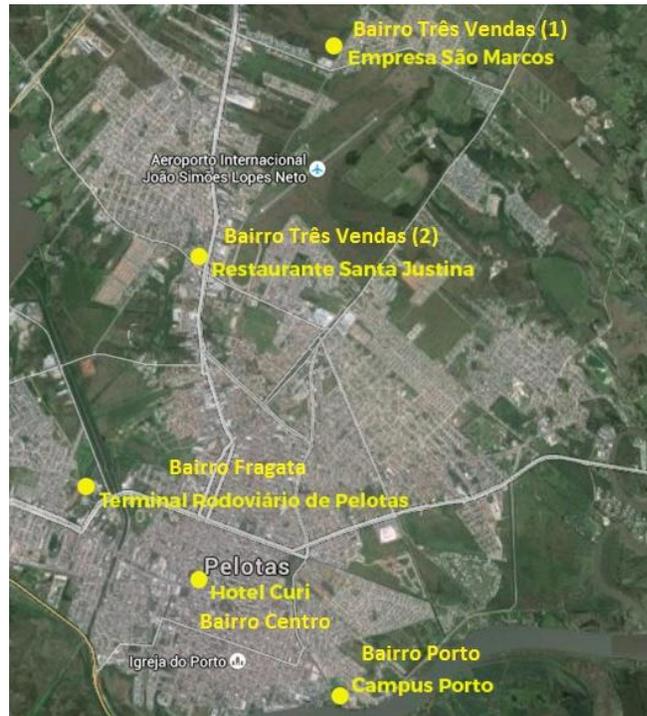


Figura 1. Mapeamiento de la localización de las probetas en la ciudad de Pelotas/RS. (Adaptado del Google earth).

La urbanización Tres Vendas se encuentra localizada en la zona norte de la ciudad. El primer lugar, presentado en las Figuras 2 y 3 se encuentra más apartado del área central, pero donde pasa todo el tráfico de desagüe de las alfarerías de la ciudad. Ya el segundo lugar de esta urbanización (Figuras 4 y 5) está situado en la parte más central donde ocurre el encuentro de dos de las principales avenidas, teniendo intenso tráfico alrededor.



Figura 2. Localización del primer ambiente exposición de las muestras en la urbanización Tres Vendas (Adaptado del Google earth).



Figura 3. Primer local de exposición de la de urbanización Tres Vendas



Figura 4. Localización del según ambiente de exposición de las muestras en la urbanización Tres Vendas (Adaptado del Google earth).



Figura 5. Según local de exposición de la urbanización Tres Vendas

La urbanización Fragata, localizada en la zona oeste, es una de las más pobladas urbanizaciones de la ciudad y a pesar de su extensión fue elegida solamente un local para análisis, por ser de fácil acceso, siendo este el Terminal de pasajeros de la ciudad, ilustrado en las Figuras 6 y 7.



Figura 6. Localización del ambiente de exposición de las muestras urbanización Fragata (Adaptado del Google earth).



Figura 7. Local de exposición de la urbanización Fragata

El local de la urbanización Centro se localiza en la calle principal de la urbanización, siendo altamente poblada y de intenso tráfico, según muestran las Figuras 8 y 9.



Figura 8. Localización del ambiente de exposición De las muestras en la urbanización Centro (Adaptado del Google earth).



Figura 9. Local de exposición de la urbanización Centro

La contrario de otros locales, la urbanización Porto localizada al sur de la ciudad, las probetas fueron expuestas al borde del Canal San Gonzalo (Figuras 10 e 11).



Figura 10. Localización del ambiente de exposición de las muestras en la urbanización Porto (Adaptado del Google earth).



Figura 11. Local de exposición de la urbanización Porto

2.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Para el ensayo de resistencia a la compresión de las muestras de cada localidad fue utilizada la prensa hidráulica de marca *Forney*, siendo este ejecutado según la NBR 5739 (ABNT, 2007). Ese ensayo fue hecho con tres cps de cada localidad a cada 4 meses, siendo realizado para la verificación de la resistencia, que debería ser al menos de 20 MPa y para apertura del cp para ejecución del ensayo colorimétrico. La evolución promedio de la resistencia a la compresión a lo largo del ensayo está presentada en la Tabla 1 donde se percibe que todas las probetas alcanzaron la resistencia mínima, siendo, entonces sometidas al ensayo colorimétrico. No fue realizado para este ensayo medidas de dispersión, debido al hecho de esta característica no ser foco del análisis.

Tabla 1. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de hormigón

Local	Tiempo de exposición			
	4 meses	8 meses	12 meses	16 meses
Urbanización Fragata	27,44	32,17	34,05	35,47
Urbanización Centro	24,48	30,52	31,61	30,28
Urbanización Porto	26,99	33,22	32,34	32,87
Urbanización Tres Vendas 1	26,99	34,33	33,39	35,37
Urbanización Tres Vendas 2	28,65	33,99	30,85	35,7

Con el valor de la resistencia a la compresión de cada local se hizo el promedio por período, y basado en la NBR 6118 (ABNT, 2014) fue trazada la curva de evolución de esta característica a lo largo del tiempo para el tipo de cemento utilizado en las probetas (CP IV).

2.1.3 Medición de la profundidad de cloruros

Posterior al ensayo de las probetas, fue aplicado nitrato de plata en toda la cara recién fracturada. Cuando esta solución es rociada en la superficie del hormigón ocurre una reacción fotoquímica, donde en presencia de cloruros libres, ocurre la formación de un precipitado blanco de cloruro de plata y en la región sin cloruros o con cloruros combinados, hay formación de un precipitado marrón u óxido de plata (Real et al., 2015). El aspecto de las muestras posterior al procedimiento,

el frente de penetración de cloruros y la medición de su profundidad están representadas en la Figura 12 y 13.

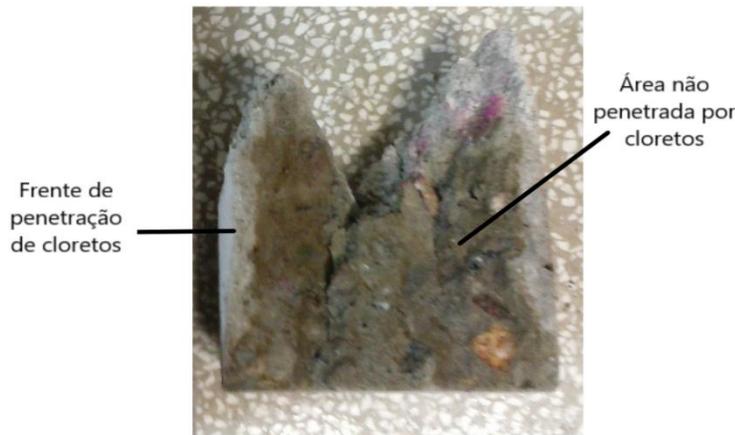


Figura 12. Ejemplo del frente de de cloruros de la muestra cloruros en la muestra fracturada



Figura 13. Ejemplo de la medición de la penetración profundidad penetrada por fracturada

Posterior al riego del nitrato de plata se esperó aproximadamente 5 minutos hasta que la solución reaccione con el hormigón. Seguidamente fue realizada la medición, siendo hecha dos en cada probeta, resultando e6 6 valores de profundidad de cloruros por local de exposición. Para fines de previsión de profundidad de agentes agresivos a mayor profundidad posee mayor relevancia, por lo tanto, fue la medida utilizada para el análisis de los resultados.

2.1.4 Análisis estadística

Para la evaluación de la influencia de las variables del estudio en los datos de profundidad de cloruro obtenidos en ensayos, fue realizado el test de análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Por tanto, fue utilizado el programa computacional SPSS 20,0 (Statistical Package for Social Sciences for Windows). Para todos los análisis fue utilizado un nivel de significancia (α) de 5%, es decir que a partir de este valor las desviaciones serán consideradas no significativas presentando un nivel de confianza de 95%. Así puede descartarse la hipótesis de que los promedios son todos iguales a 5% caso el valor de “p” encontrado sea menor que este valor. Para ese análisis estadístico fueron consideradas como variables independientes el local de exposición de las muestras (urbanización Fragata, Centro, Porto, Tres Vendas 1 y Tres Vendas 2) y el tiempo en que estas quedarán expuestas (4, 8, 12 y 16 meses). Ya como variable dependiente se consideró la profundidad de penetración de cloruros.

2.1.5 Caracterización climática de la ciudad de Pelotas/RS

Fueron recolectadas informaciones para la caracterización de la atmósfera local con la intención de verificar la agresividad del ambiente de exposición de las muestras, siendo destacados como factores de mayor influencia la humedad relativa del aire, temperatura y precipitaciones. Es importante destacar que el monitoreo realizado fue del macro clima del ambiente de exposición de las muestras, en este caso la ciudad de Pelotas/RS. Tales datos fueron obtenidos a través del sitio electrónico de la Estación Agroclimatológica de Pelotas, localizada en Capao do Leao, que dispone de boletines diarios y mensuales de variables meteorológicas. Las Figuras 14, 15 y 16 muestran las precipitaciones acumuladas, los promedios de humedad relativa y la temperatura máxima y mínima en los meses para los 4 períodos estudiados (4 meses, referente a los meses de mayo a septiembre; de 4 a 8 meses, siendo de septiembre a enero; de 8 a 12 meses, referente de enero a mayo; y de 12 a 16 meses, donde fue analizado de mayo a septiembre). Para la aplicación del modelo de vida útil,

fueron utilizados datos de la humedad relativa y temperatura máxima y mínima diaria, siendo para esta última calculado el promedio. No fueron obtenidas informaciones referentes a la orientación de los vientos durante la época estudiada, debido a la dificultad de análisis de esta variable en relación a los diferentes locales de exposición.

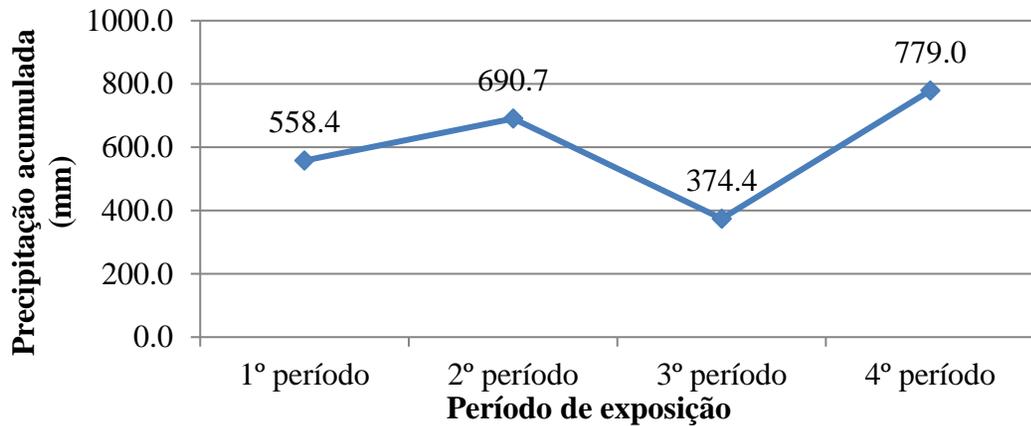


Figura 14. Precipitaciones acumuladas para cada período de exposición de las muestras

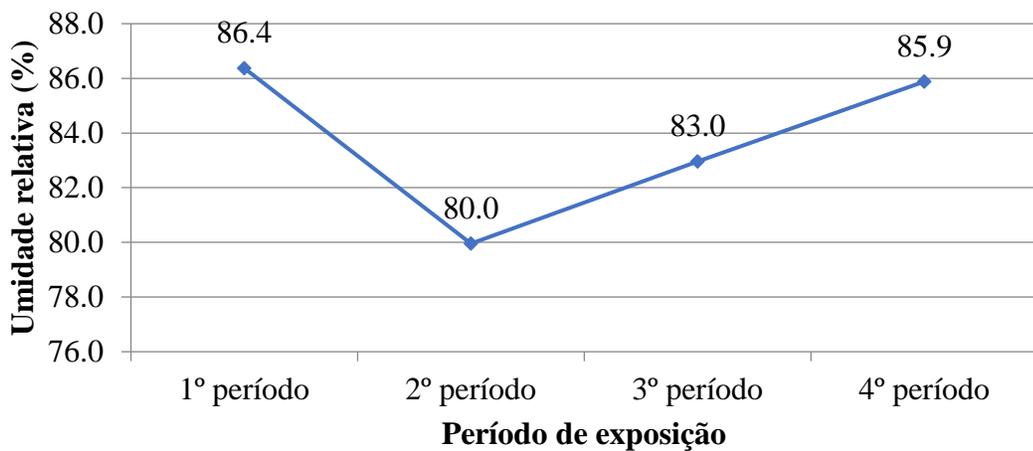


Figura 15. Humedad relativa promedio para cada período de exposición de las muestras

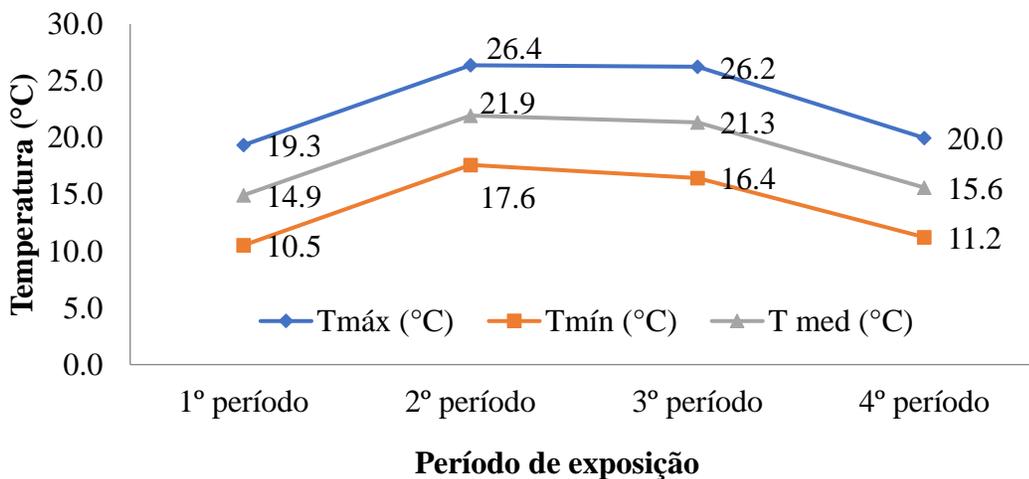


Figura 16. Temperatura promedio en cada período de exposición de las muestras

2.2 Modelo de previsión de vida útil

Para el análisis de cloruros en estructuras de hormigón, fue seleccionado el modelo de Bob (1996), ya que la estimación hecha por este método es realizada en términos de profundidad recorrida por el contaminante, en vez de hacer el análisis en términos de concentración, como gran parte de los modelos para análisis de cloruros. Bob (1996) presentó inicialmente, un modelo usado en el análisis de la profundidad de carbonatación de estructuras y posteriores verificaciones basadas en datos experimentales de larga duración observó que la ecuación (1) podría ser utilizada para el modelaje del proceso de penetración de cloruros (Andrade, 2001). Este modelo considera propiedades del hormigón, como resistencia a la compresión, y características ambientales, como temperatura y humedad relativa.

$$x_m = 150 \left(\frac{ck_1k_2d}{f_c} \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde:

x_m = profundidad promedio de penetración de cloruros (mm);

f_c = resistencia a la compresión del hormigón (N/mm²);

c = capacidad de fijación de los cloruros en función del tipo de cemento;

k_1 = coeficiente de influencia de la temperatura;

k_2 = coeficiente de influencia de la humedad relativa;

t = tiempo (años);

d = relación entre la concentración crítica y la concentración superficial de cloruros en la estructura.

Para la aplicación de este modelo fueron utilizadas la temperatura promedio y humedad relativa diaria de la ciudad de Pelotas/RS durante el período de exposición de las muestras, así como la resistencia a la compresión (f_{ck}) promedio diario del hormigón obtenida a través de la curva de evolución de esta característica. Ya los parámetros c , k_1 , k_2 están presentados en la Tabla 2. El modelo fue aplicado para diferentes valores del parámetro d , como forma de analizar diferentes concentraciones críticas y superficiales de cloruros en la estructura, ya que esta variable representa la relación entre las dos concentraciones.

Tabla 2. Parámetros relacionados con el modelo de Bob, 1996 (Andrade, 2011)

Parámetro k_1		Parámetro c		Parámetro k_2		Parámetro d	
k_1	T(°C)	c	(%) adiciones en el cemento	k_2	UR (%)	D	r
0,67	0 a 5	1	0	0,75	50	2	0 a 19
0,75	5 a 15	0,9	15	1	85	1	20
1	15 a 25	0,75	30	0,75	100	0,5	50
1,25	25 a 35	0,67	50	-	-	0,33	65
1,5	35 a 45	-	-	-	-	0,16	85

3. RESULTADOS

3.1 Profundidad de cloruros por el método de ensayo natural

Las máximas profundidades de penetración de cloruros para los diferentes locales de exposición y los diferentes tiempos están presentadas en la Figura 17.

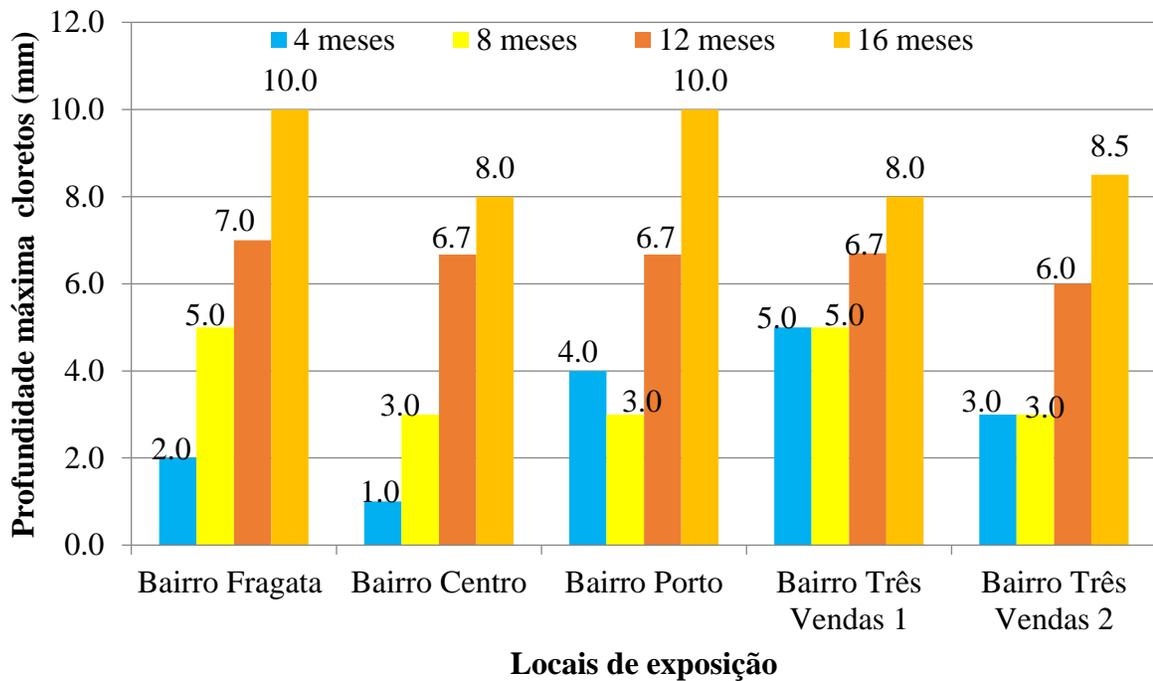


Figura 17. Profundidad de penetración de cloruros para cada localidad y tiempo de exposición

Evaluando los datos, se observa, conforme lo esperado una tendencia de aumento del frente de cloruros entre la primera y la última medición para todas las localidades. Se observa que, a mayor profundidad de penetración de cloruros posterior a los 16 meses de exposición en ambiente urbano, fueron encontradas en la urbanización Fragata y Porto, siendo de 10mm. Ese valor fue sorprendente, pues no se creía que serían encontrados cloruros libres, dentro de la ciudad de Pelotas, visto que es una ciudad apartada del ambiente marítimo. Así mismo tiempo se sabe que la laguna dos Patos, que circunda la ciudad, posee períodos en el año que cambia el estado del agua de dulce para salada, pudiendo ser una explicación para la aparición en hormigones, siendo importante resaltar también que en períodos de baja pluviosidad fueron encontrados valores elevados de cloruros en algunos puntos desde la laguna Mirim hasta la laguna dos Patos (Souza, 2015) y valores de cloruro sobre lo establecido por el CONAMA para agua dulce en puntos del canal de prolongación de la Avenida Bento Gonçalves (Santos et al., 2012). Se puede decir así, que hay un indicativo de que los cloruros forman parte de la atmósfera de la ciudad de Pelotas/RS, donde la menor profundidad encontrada para este mismo tiempo de exposición fue de 8mm, para la urbanización Centro y para las muestras 1 de urbanización Tres Vendas.

A través de ANOVA de dos vías fue posible confirmar la influencia de la variable tiempo en la profundidad de cloruros y se constató que la variable local y la interacción entre estas variables no influyó. A partir de este análisis se verifica que toda la ciudad de Pelotas/RS tiene el mismo comportamiento en cuanto a la penetración de cloruros, no interfiriendo a cambio entre urbanizaciones, apenas en tiempo de exposición. Analizando aisladamente como forma de verificar cuales variables difieren entre sí, relativamente la profundidad de cloruros se encontró que el tiempo interfiere significativamente en los resultados de exposición frente a la penetración de cloruros. El análisis de la variable independiente “local”, indicó diferencia significativa del primer local de la urbanización Tres Vendas con relación a los locales Porto y Tres Vendas 2, indicada por $p \leq 0,05$. Para los demás locales no fue encontrada diferencia significativa, aceptándose la hipótesis de promedios iguales entre estos y las profundidades de cloruros, siendo importante resaltar que los resultados tienen un nivel de confianza de 95%.

3.2 Aplicación del modelo de Bob (1996)

La aplicación del modelo de previsión de vida útil para penetración de cloruros fué realizada apenas para los locales que presentaron diferencia significativa en el análisis estadístico de los datos, siendo para el primero y segundo local de la urbanización Tres Vendas y urbanización Porto. Las Figuras 18, 19 y 20 presentan la comparación entre los resultados encontrados con la aplicación del modelo y del ensayo natural, para los diferentes valores de d.

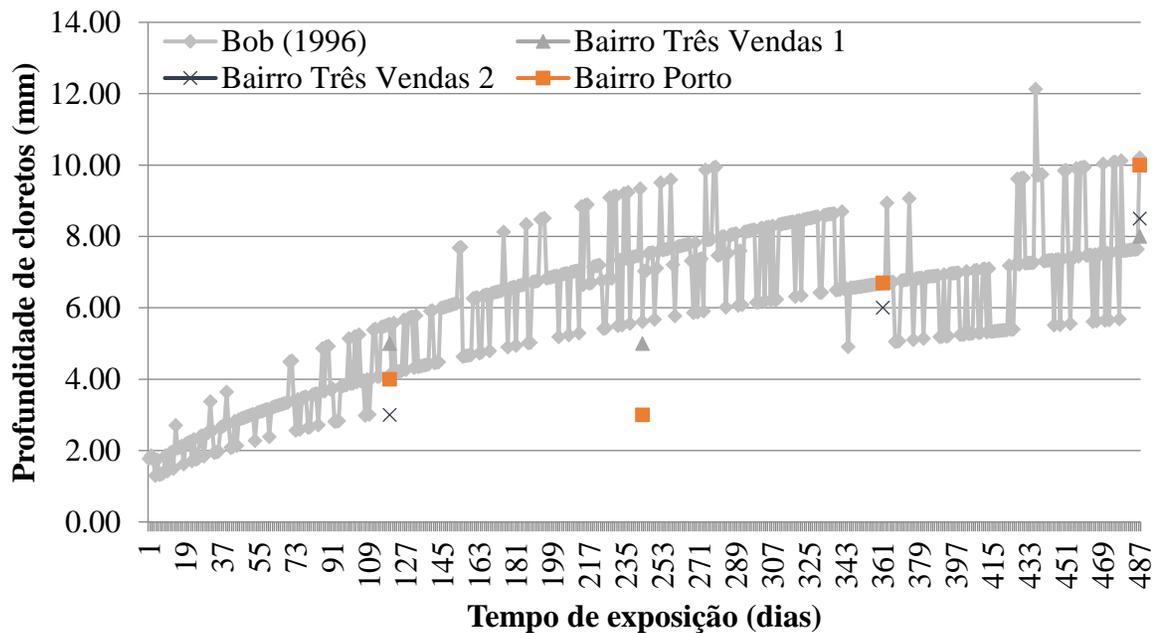


Figura 18. Modelo de Bob (1996) con parámetro d = 2

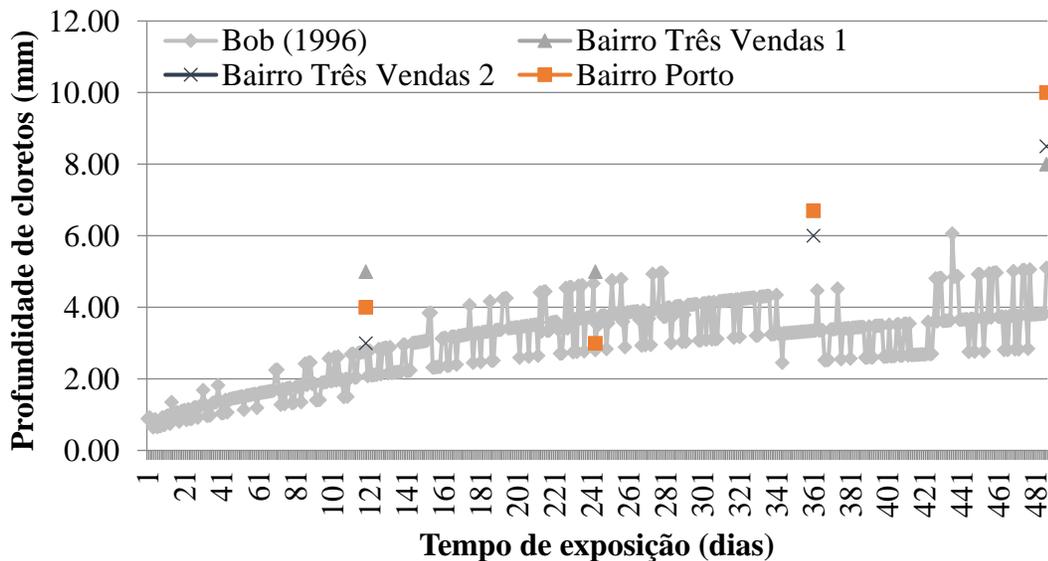


Figura 19. Modelo de Bob (1996) con parámetro d = 1

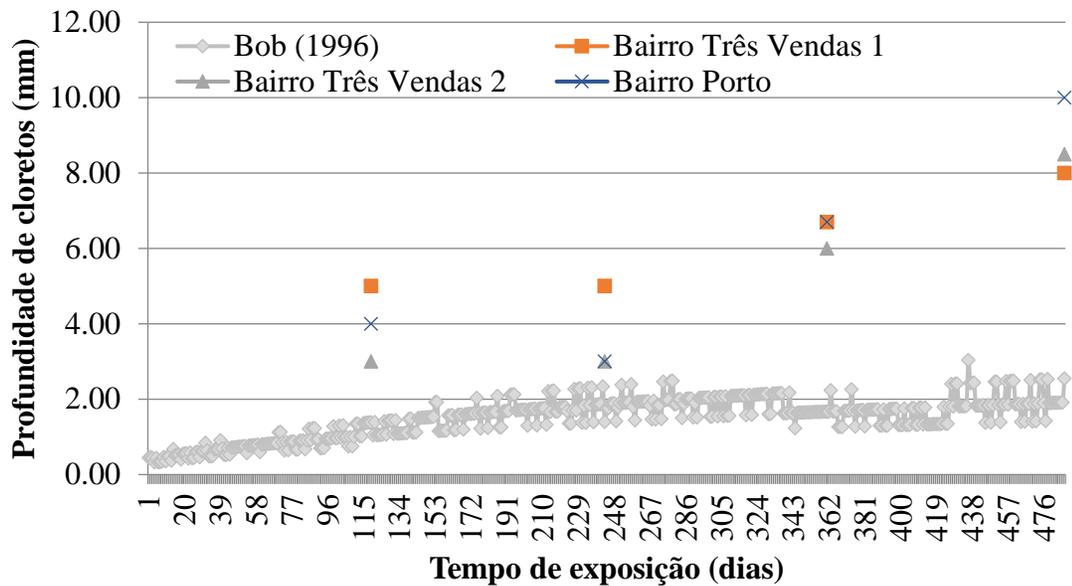


Figura 20. Modelo de Bob (1996) con parámetro $d = 0,5$

Se observa que para todas las localidades el modelo que mejor se adapta a los valores encontrados en el ensayo natural fue con el parámetro $d = 2$, es decir con la relación entre concentración crítica y concentración superficial de cloruros en la estructura entre 0 y 19. Se percibe también que para el 2° período ninguno de los locales tuvo sus valores descritos por el modelo aplicado, al contrario de los otros períodos de exposición.

Analizando aisladamente cada local para la mejor curva encontrada, y basados en los parámetros de entrada del modelo, se puede decir que para la urbanización Tres Vendas 1, para el primer período (profundidad de 5mm), se encontró el valor más próximo de 4,92mm a los 71 días de exposición, con temperatura promedio de 16,4°C y humedad relativa de 85%. Para el 2° período (profundidad de 5mm) fue también encontrado el valor aproximado de 4,92 mm de profundidad para 188 días de exposición, temperatura promedio de 24,9°C y humedad relativa de 88%. En el 3° período (profundidad 6,7mm), se encontró 6,69mm a los 340 días de exposición, con temperatura promedio de 16,1°C y humedad relativa de 85,8% y 6,71mm a los 342 días, temperatura promedio de 12°C y humedad relativa de 83,8%. Ya para el 4° período (profundidad de 8mm), se encontró 7,65mm para 486 días de exposición, temperatura promedio de 17,1°C y humedad relativa de 76%. Para la urbanización Tres Vendas 2, en el primer período donde la profundidad encontrada en el ensayo natural fue de 3mm, al aplicar el modelo se encontró exactamente ese valor a los 47 días de exposición, temperatura promedio de 16,95°C y humedad relativa de 95,20%. En el 2° período donde la profundidad del ensayo natural fue la misma, el valor más próximo encontrado por el modelo fue de 3,93mm con 120 días de exposición, temperatura promedio de 15,7°C y humedad relativa de 86,50%. Para el 3° período se encontró el mismo valor del ensayo natural (profundidad de 6mm), para 273 días de exposición, temperatura promedio de 25°C y humedad relativa de 86,3%. Para el último período (profundidad de 8,5mm), se obtuvo con el modelo la profundidad de 8,81mm a los 363 días de exposición con temperatura promedio de 16°C y humedad relativa de 82,30%.

Finalmente, para la urbanización Porto en el 1° período el valor de 4mm fue encontrado en el ensayo natural, en cuanto en el modelo fue obtenido 3,99mm a los 83 días de exposición con temperatura promedio de 17,9°C y humedad relativa de 90,80%. En el segundo período, esta urbanización tuvo el mismo comportamiento de la urbanización Tres Vendas 1, en cuanto el 3° período el valor encontrado fue el mismo para la urbanización Tres Vendas 2. Para el 4° período (profundidad de

10mm), por el modelo se encontró el valor aproximado de 10,02mm para 469 días de exposición, temperatura promedio de 16,9°C y humedad relativa de 83,50%.

Haciendo una evaluación de forma general, para la ciudad de Pelotas/RS, el modelo de Bob (1996) fue aplicado para cada período de exposición dos probetas. Fue utilizado como humedad relativa de 85%, debido a la humedad de todos los períodos ser cercana a ese valor. Para la temperatura, como ocurre una gran variación diaria, fueron utilizadas las temperaturas máximas y mínimas de cada período. En cuanto a la resistencia a la compresión fue utilizado el promedio de todos los locales en cada período. El resultado está presentado en la Tabla 3 y en la Figura 21.

Tabla 3 – Comparación de los resultados del ensayo natural con el modelo de Bob, 1996

Tiempo de exposición (meses)	Profundidad cloruros (mm)				
	Tres Vendas 1	Tres Vendas 2	Porto	Bob (1996)	
				Bob Tmax	Bob Tmin
4	5	3	4	4,8	5,76
8	5	3	3	5,01	5,61
12	6,7	6	6,7	6,19	6,93
16	8	8,5	10	7,65	9,17

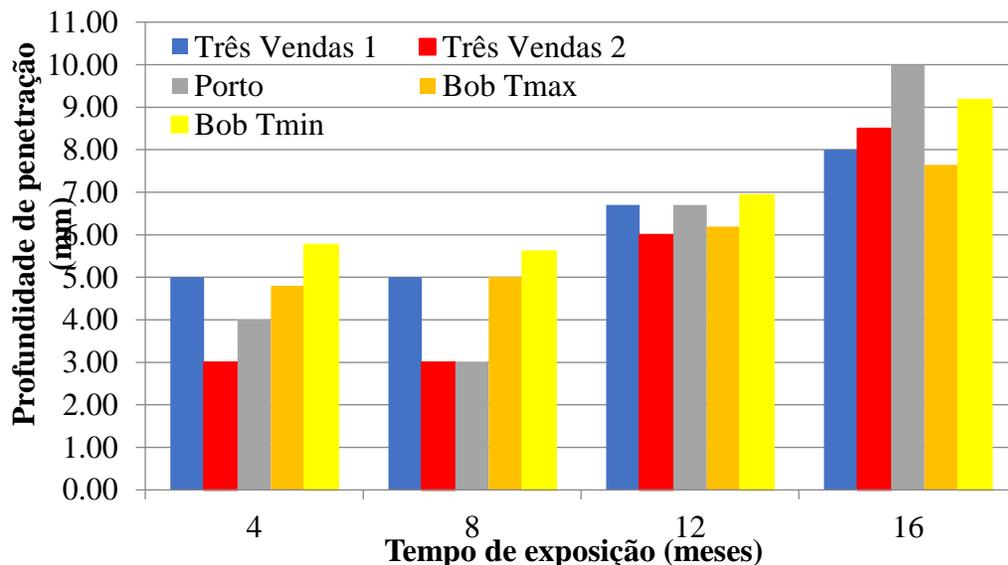


Figura 21. Comparación de los resultados del ensayo natural con el modelo de Bob (1996)

Haciendo un análisis de los resultados, el período que se mostró más próximo del modelo de Bob (1996), para ambas temperaturas fue de 12 meses, quedando cercano de los valores encontrados para la urbanización Porto y Tres Vendas 1 usando la temperatura mínima, y de la urbanización Tres Vendas 2 utilizando la temperatura máxima. Para el período de 4 meses, los valores encontrados se aproximarán solamente de la profundidad encontrada en la urbanización Tres Vendas 1, siendo el más próximo el resultado encontrado utilizando la temperatura máxima. Mientras que para 8 meses el modelo resultó en un valor muy próximo a la urbanización Tres Vendas 1 también para la temperatura máxima. Posterior al período de 16 meses, independientemente de la temperatura, fueron obtenidos con el modelo resultados menores del obtenido para el ensayo natural, donde el valor encontrado con la mayor temperatura se aproximó al de urbanización Tres Vendas 1, y la mayor profundidad (9,17mm) fue encontrada con la menor

temperatura. Esta diferencia puede ser debido a la gran variación de temperatura diaria de la ciudad de Pelotas/RS, como también por el hecho del modelo considerar solamente ciertos valores de humedad relativa (50%, 85% y 100%), siendo que la humedad para todos los períodos se encuentra entre los valores de 85 y 100%.

4. CONCLUSIONES

Primeramente, al observar los resultados encontrados en el ensayo natural para la penetración de cloruros se aprecia una tendencia de aumento entre la primera medición hecha posterior a los 4 meses de exposición y la última posterior a 16 meses para todos los locales analizados.

Los valores obtenidos para la penetración de cloruros demuestran que la ciudad de Pelotas/RS, a pesar de ser apartada del ambiente marítimo, favorece el avance de este agente agresivo para el interior del hormigón debido a elevada humedad y variaciones de temperatura que llegan a ciclos de humectación/secado del hormigón, facilitando la absorción y avance de cloruros al interior de la estructura. Analizando el mayor (10mm para las urbanizaciones Fragata y Porto) el menor (8mm para Tres Vendas 1) valor de profundidad de cloruros para un tiempo de exposición de 16 meses, se encontró una variación de aproximadamente 20%.

Con el uso del análisis estadístico se confirmó que la variable tiempo interfirió significativamente en los resultados de exposición frente a la penetración de cloruros y se constató que en cambio entre urbanizaciones y la interacción entre los locales y el tiempo no influyó. A través del test de comparaciones múltiples fue encontrada una diferencia significativa entre el local Tres Vendas 1 con los locales Porto y Tres Vendas 2.

Al aplicar el modelo de previsión de vida útil de Bob (1996) para analizar la penetración de cloruros, fue posible percibir que para todos los locales la opción que mejor se adecuó a los valores encontrados en el ensayo natural fue utilizando el parámetro $d = 2$, es decir con la relación entre la concentración crítica y la concentración superficial de cloruros en la estructura variando de 0 a 19. Analizando los locales aisladamente y cada período de exposición, se percibe que dependiendo de los valores de las variables de entrada (tiempo, temperatura y humedad relativa) fueron encontrados valores aproximados de profundidad a lo largo del tiempo para todas las localidades. Por tanto, al aplicar el modelo de previsión de forma general para la ciudad de Pelotas, se observó que los valores obtenidos se aproximaron de los datos tomados del ensayo natural para los 12 meses de exposición para las urbanizaciones Tres Vendas 1 y Porto, utilizando la temperatura mínima, y de la urbanización Tres Vendas 2 para la temperatura máxima. Para los tiempos de 4 y 8 meses el modelo presentó valores muy próximos a la urbanización Tres Vendas 1.

Se concluyó que el modelo de Bob (1996) presentó diferencias entre los valores obtenidos con su aplicación y los datos del ensayo natural, probablemente debido a la gran variación de temperatura diaria de la ciudad de Pelotas y el hecho del modelo considerar solamente ciertos valores de humedad relativa (50%, 85% y 100%) siendo que la humedad en la ciudad en cuestión, para todos los períodos, se encuentra entre los valores de 85 y 100%. Por ello el modelo aplicado con todo y la diferencia encontrada, presentó buena adherencia a los datos observados mostrando ser adecuado para algunas situaciones, demostrando potencial en describir el comportamiento de la profundidad de cloruros a lo largo del tiempo para la ciudad de Pelotas, siendo necesarios algunos ajustes en los parámetros de entrada.

Así con el indicativo de la presencia de cloruros en la ciudad analizada y el potencial demostrado por el método estudiado es importante para trabajos futuros la verificación de la concentración de cloruros en el ambiente de exposición y la comprobación de la profundidad de cloruros en el hormigón a través de otras formas que complementen el ensayo colorimétrico, para que sea posible su refinamiento de las variables aplicadas en el modelo y su mejor aplicación.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Constructora Schumman por la donación de las probetas para la realización de esta pesquisa y al Laboratorio de Materiales y Técnicas Constructivas da Engenharia Civil de la UFPel por toda la ayuda y disponibilidad durante el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- Andrade, J. J. O. (2001), “*Contribuição a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.277.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010) “*Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção*”. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos, p.414.
- Bob, C. (1996), “*Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures*”. In: International conference: concrete repair, rehabilitation and protection. Proceedings, Dundee, pp.17-28.
- Carmona, T. G. (2005), “*Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação*”. Dissertação de Mestrado em engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.103.
- Estação Agroclimatológica de Pelotas. “*Boletim Agroclimatológico*”. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>> Acessado em: 15.jan.2016.
- Gentil, V. (2003), “*Corrosão*”, Rio de Janeiro, LTC, p.341.
- Helene, P. (1997) “*Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*”. Ambiente Construído, São Paulo, v.1, n.2, pp.47-57.
- Norma Técnica Fondonorma (2012). *NTF 4015 – Concreto. Durabilidad*. Santiago de León de Caracas.
- Real, L. V., et al. (2015), “*Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*”. Revista Alconpat, v.5, nº2, pp.149 – 159. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Santos, F. S., et al. (2012), “*Estudo das características físico - químicas da água do Canal Prolongamento da Av. Bento Gonçalves – Pelotas – RS*”. In: Congresso norte nordeste de pesquisa e inovação. Anais. Palmas.
- Silva, F. G. S. (2006), “*Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, p.236.
- Souza, M. F. (2015), “*Qualidade da água do canal São Gonçalo RS/Brasil – uma avaliação hidroquímica e considerando seus usos múltiplos*”. Dissertação de Mestrado em recursos hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p.105.
- Souza, V., Ripper, T. (2009), “*Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*”, São Paulo, Pini, p.255.
- Vieira, F. M. P. (2013), “*Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.242.

Evaluación de los efectos del nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones cloruros

T. Zanon¹ , R. Schmalz^{1*} , F. G. S. Ferreira¹ 

*Autor de Contacto: rosanaschmalz@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

Recepción: 20/10/2017 | Aceptación: 20/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El presente trabajo estudió la influencia de la nanosílice dispersa en superplastificante, y su efecto combinado con la sílice activa, en diferentes propiedades de los hormigones. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad, además de ensayos acelerados de durabilidad frente a los iones de cloruro. Los resultados indicaron que la adición de nanosílice (0.1 a 0.5%) no mejoró los hormigones en ninguno de los ensayos realizados. Por otro lado, para los contenidos de 0.5 y 0.7% de nanosílice combinados con 10% de sílice activa, hubo un aumento en la resistencia a la compresión, reducción de la absorción capilar y reducción de la penetración de cloruros.

Palabras clave: concreto; iones cloruros; nanopartículas; nanosílice.

Citar como: T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira (2018), "Evaluación de los efectos del nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones cloruros", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 138 - 149, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sao Carlos, Sao Carlos-SP, Brasil.

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Evaluation of nanosilica effects on concrete submitted to chloride ions attack

ABSTRACT

The present paper studied the influence of nanosilica dispersed on superplasticizer, and its combined effect with silica fume, on different concrete properties. Compressive strength, tensile strength by diametrical compression and water absorption by capillarity tests, as well as accelerated durability tests against chloride ions were carried out. The results indicated that the isolated nanosilica addition (0.1 to 0.5%) did not improve the concretes in any of the tests performed. However, for the contents of 0.5 and 0.7% of nanosilica combined with 10% of silica fume, there was an increase in compressive strength, reduction of capillary absorption and reduction of the chlorides penetration.

Keywords: concrete; chloride ions; nanoparticles; nanosilica.

Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto

RESUMO

O presente trabalho estudou a influência da nanosílica dispersa em superplastificante, além do seu efeito combinado com a sílica ativa, em diferentes propriedades dos concretos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, além de ensaios acelerados de durabilidade frente aos íons cloreto. Os resultados obtidos indicaram que a adição de nanosílica de forma isolada (0,1 a 0,5%) não conferiu melhorias aos concretos, em nenhum dos ensaios realizados. No entanto, para os teores de 0,5 e 0,7% de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa, houve aumento de resistência à compressão, redução da absorção capilar e redução da frente de penetração de cloretos.

Palavras-chave: concreto; íons cloreto; nanopartículas; nanosílice.

1. INTRODUCCIÓN

Motivado al aumento de los casos de deterioro de las estructuras de concreto armado, el estudio de la durabilidad de los materiales cementíceos se volvió el foco de diversas investigaciones en los últimos años.

El consenso de la literatura es que el uso de adiciones minerales trae innumerables beneficios al concreto, entre ellos la mejor resistencia a la fisuración térmica debido al bajo calor de hidratación, aumento de la resistencia final y reducción de la permeabilidad, debido al refinamiento de los poros y fortalecimiento de la zona de transición (Mehta; Monteiro, 2014).

La sílice activa es una de las principales adiciones minerales presentes en el mercado y, además de ser una super puzolana, es también considerada un filler, por presentar partículas más finas que el cemento, con diámetro promedio entre 0,1 y 0,2 μm (Dal Molin, 2011).

En la era de la nanotecnología, nanopartículas de sílice han sido incorporadas a los materiales cementíceos. Li *et al.* (2017a) explican que, por presentar granulometría inferior la sílice activa, la nanosílice tiene mayor superficie específica, lo que potencia su efecto puzolánico. Los autores citan que, si son usadas en conjunto, los efectos sinérgicos de las adiciones pueden volverlas aún más eficaces en el rellenado de los vacíos existentes en la matriz cementícea y en la densificación de la microestructura. La sílice activa ya se consagró como una adición mineral eficaz en la mejoría de diversas propiedades de los materiales cementíceos. No obstante, la nanosílice aún es objeto de investigaciones recientes que buscan estudiar sus efectos, tanto de forma aislada como en conjunto con la sílice activa, en las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido, además

de los parámetros de durabilidad frente a diferentes agentes agresivos (Berra *et al.*, 2012; Lim; Mondal, 2015; Ganesh *et al.*, 2016; Ghafoori; Batilov; Najimi, 2016; Joshaghani; Moeini, 2017; Li *et al.*, 2017a; Li *et al.*, 2017b).

Entre los diferentes agentes agresivos presentes en el medio ambiente se tienen los iones cloruros y su capacidad de desencadenar la corrosión de las armaduras aun cuando la solución contenida en los poros del concreto tiene pH elevado. Además de eso, posterior a su reacción con el acero, de los iones cloruro no son fijados y quedan disponibles para dar continuidad a la reacción (Silva, 2006). Esas particularidades hacen del ataque por cloruros uno de los principales mecanismos de degradación de las estructuras de concreto.

Ante ello éste trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de la adición del nanosílice disperso en aditivo superplastificante, así como su uso combinado con la sílice activa, en propiedades mecánicas y físicas y la durabilidad de hormigones sometidos al ataque de cloruros.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Caracterización de los materiales

Para esta pesquisa, fueron utilizados los siguientes materiales: cemento Portland, agregado fino, agregado grueso, nanosílice, sílice activa y aditivo superplastificante.

Se uso un cemento de alta resistencia inicial (CPV ARI). Los resultados de la caracterización física y química son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas do CPV ARI.

Propiedades químicas	Resultados (%)	Propiedades físicas	Resultados	
SiO ₂	19,17	Masa específica (g/cm ³)	3,12	
Al ₂ O ₃	5,03	Inicio de pega (min)	135	
Fe ₂ O ₃	3,21	Final de pega (min)	210	
CaO	63,97	Pasta de consistencia normal	31,5	
MgO	0,61	Finura	Retenido #200 (%)	0,1
Na ₂ O	0,06		Blaine (m ² /kg)	473
K ₂ O	0,61	Resistencia a compresión (MPa)	1 día	27,5
SO ₃	2,84		3 días	42,0
Residuo insoluble	0,85		7 días	48,7
Pérdida al fuego	3,79		28 días	52,2

La caracterización física de los agregados fino y grueso están presentados en la Tabla 2 y las curvas de distribución granulométrica, obtenidas con base en la NBR NM 248 (ABNT, 2003), están presentadas en las Figura 1 y Figura 2, respectivamente.

Tabla 2. Resultados de la caracterización física de los agregados fino y grueso.

Parámetros	Metodología	Agregado Fino	Agregado Grueso
Masa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 NBR NM 53	2,64	2,77
Masa unitaria seca e suelta (kg/m ³)	NBR NM 45	1505	1422
Masa unitaria compactada (kg/m ³)	NBR NM 45	1704	1568
Absorción de agua (%)	NBR NM 30 NBR NM 53	0,34	2,26
Material pulverulento (%)	NBR NM 46	1,33	1,00

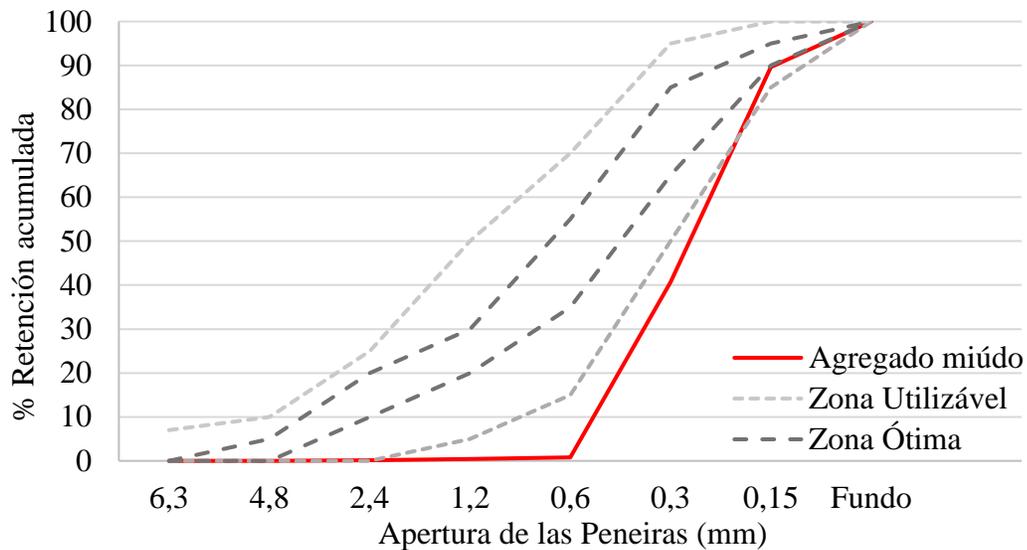


Figura 1. Curva de distribución granulométrica del agregado fino.

El agregado fino presentó módulo de finura igual a 1,33 y dimensión máxima característica igual a 0,6 mm. A pesar de que el agregado fino presenta curva granulométrica fuera de la zona permitida por la NBR 7211 (ABNT, 2009), la propia norma permite su uso, desde que estudios previos de dosis comprueben su aplicabilidad. Siendo así, y por tratarse de un material comercializado en la región de desarrollo del estudio, su uso fue mantenido.

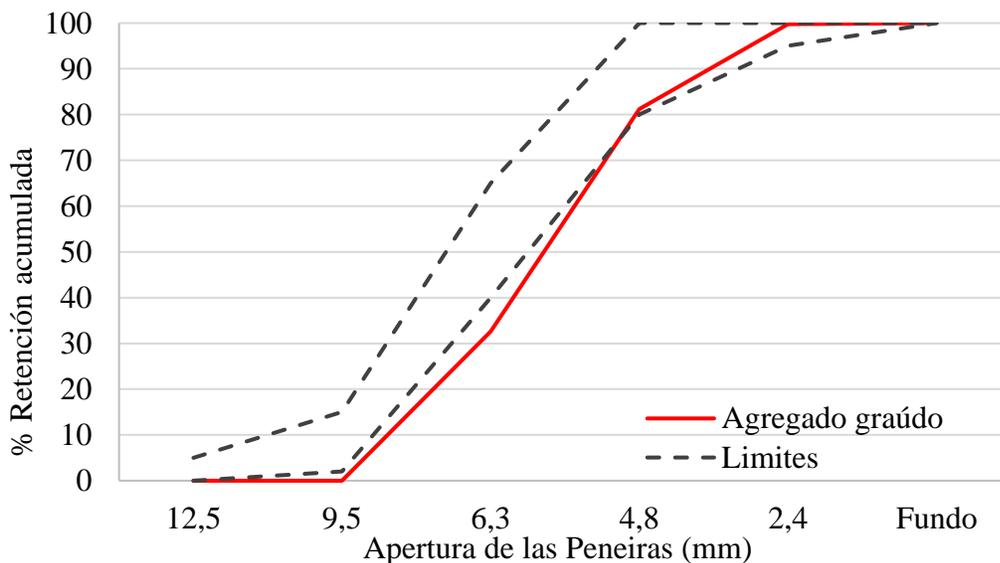


Figura 2. Curva de distribución granulométrica del agregado grueso.

Se usó un nanosílice disperso en un aditivo líquido superplastificante a base de policarboxilato, cuya dosis recomendado pelo fabricante varía entre 0,5 y 3,0% en relación con la masa de aglomerante. Sus características están presentadas en la Tabla 3. En la Tabla 4 están las características físicas y químicas de la sílice activa.

Tabla 3. Resultados de caracterización da nanosíllice.

Producto	Nanosíllice
Aspecto	Líquido homogéneo color carne
Masa específica (g/cm ³)	1,06
Dosis de sólidos (%)	31,5
pH	2,6
Cloruros solubles en agua (%)	≤ 0,15

Fuente: Silicon Industria y Comercio de Productos Químicos LTDA.

Tabla 4. Resultados de caracterización física y química de la sílice activa.

Parámetros físicos		Parámetros químicos	
Densidad (g/cm ³)	2,10	Equivalente alcalino, en Na ₂ O (%)	0,7
		perdida al fuego (%)	3,7
Superficie específica (m ² /kg)	20.000	SiO ₂ (%)	93,0
		Na ₂ O (%)	0,2
Humedad (%)	0,1	Fe ₂ O ₃ (%)	0,5
		CaO (%)	0,5
Retención 45 mm (# 325) (%)	3,7	MgO (%)	0,4
		Al ₂ O ₃ (%)	0,2
		K ₂ O	0,9

Fuente: Dow Corning Silicio de Brasil.

En el concreto de referencia, sin incorporación de sílice y nanosíllice, fue utilizado un aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico, MasterGlenium® Sky 150, cuyas especificaciones están presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización del aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150.

Producto	MasterGlenium® Sky 150
Aspecto	Líquido blanco turbio
Masa específica (g/cm ³)	1,055 – 1,085
pH	7,5 – 9,5
Dosis de sólidos (%)	28,0 – 31,0

Fuente: BASF S.A.

2.2. Definición de los trazos

El estudio de la influencia del nanosíllice fue realizado en hormigones de dosis 1:1,6:1,6 (cemento: agregado fino: agregado grueso) y relación agua/aglomerante (a/agl) igual a 0,4.

Como ya fue citado, el nanosíllice usado en este trabajo está disperso en aditivo superplastificante, lo que limito las dosis a ser utilizados. La consistencia de los hormigones, obtenidas conforme la NBR 13276 (ABNT, 2016), aumentaban con el aumento de la dosis de nanosíllice utilizado. De esa forma, no fue posible seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto a las dosis límites de uso de material (0,5 a 3,0%). La dosis de aditivo superplastificante utilizado en el concreto de referencia también fue definida con base a la consistencia de la mezcla.

Siendo así, fueron analizados dosis de nanosíllice entre 0,1 y 0,7%, usada tanto de forma aislada como combinada con sílice activa, siendo esta adicionada al concreto como sustitución parcial del cemento (10% en volumen).

Los hormigones fueron identificados por una nomenclatura de tipo C-N-S, donde N y S representan las dosis de nanosíllice y sílice activa utilizados, respectivamente. Ya el concreto de referencia es

identificado como REF. Las composiciones de los hormigones y las respectivas consistencias están presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición de las dosis en el concreto.

Hormigones	Cantidad de materiales (kg/m ³)							Consistencia (cm)
	Cemento	SA	AM	AG	NS	SP	Agua	
C-0,1-0	524,90	-	839,84	839,84	0,52	-	209,96	180
C-0,3-0	524,38	-	839,00	839,00	1,57	-	209,75	240
C-0,5-0	523,86	-	838,18	838,18	2,62	-	209,54	285
C-0,5-10	474,76	35,51	844,03	844,03	2,55	-	204,11	220
C-0,7-10	474,31	35,47	843,21	843,21	3,57	-	203,91	250
REF	524,39	-	839,02	839,02	-	1,57	209,75	240

Leyenda: SA = sílice activa; AM = agregado fino; AG = agregado grueso; NS = nanosílice; SP = aditivo superplastificante.

El tiempo total de mezcla de los materiales fue de 7 minutos, siendo la mezcla realizada en hormigonera, en el siguiente orden de colocación de los materiales: arena, 90% del agua, cemento, aditivo, 10% del agua y piedra. En los hormigones con sílice activa, el material fue adicionado a la mezcla junto al cemento.

Posterior a la mezcla, fueron vaciados probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Posterior 24 h, las probetas fueron desencofradas y llevados a cámara húmeda, donde permanecerán hasta la data de ensayo.

2.3. Propiedades evaluadas

La influencia del nanosílice y la sílice activa fue evaluada en las propiedades mecánicas y físicas de los hormigones, por medio de ensayos de resistencia mecánica y de absorción de agua por capilaridad, y la durabilidad de estos frente a la acción de los iones cloruros.

2.3.1. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica fue evaluada por medio de la realización de ensayos de resistencia a compresión axial a la edad de 1, 7 y 28 días (ABNT NBR 5739, 2007) y de resistencia a tracción por compresión diametral a la edad de 28 días (ABNT NBR 7222, 2011).

2.3.2. Absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad fue realizado con base en la NBR 9779 (ABNT, 2012).

Posterior a los 28 días de curado, los hormigones fueron llevados a estufa a 105 ± 5 °C hasta alcanzar constancia de masa y entonces se determinó la masa seca a 23 ± 2 °C. Las probetas fueron posicionadas en una lámina de agua, sobre soportes metálicos, de modo de permitir el contacto del agua con la base de la probeta y evitando el contacto con otras superficies. El ensayo tuvo duración de 72 horas y las masas de las probetas fueron verificadas posterior 3h, 6h, 24h, 48h y 72h posterior al inicio del ensayo. Posterior a la última pesada, las probetas fueron ensayadas para visualización de la ascensión capilar máxima alcanzada por el agua.

2.3.3. Determinación del frente de penetración de cloruros

El frente de penetración de los iones cloruros fue determinada por medio de ciclos de secados y humectación en solución de cloruro de sodio (NaCl).

Posterior a completar 28 días de curado, los hormigones fueron dejados en ambiente de laboratorio para ser secados por 4 días y entonces sumergirlos hasta la mitad de su altura en la solución de

NaCl (3,5%) por 3 días. Finalizados los 3 días, las probetas fueron removidas de la solución y se inició nuevamente el ciclo, los cuales fueron repetidos durante 16 semanas.

Posterior 8 y 16 semanas, las probetas fueron separadas y con solución de nitrato de plata (0,1 M) fue rociada en la superficie fracturada. En presencia de cloruros libres el nitrato de plata reacciona y resulta en cloruros de plata (tonalidad clara), y en ausencia, genera óxido de plata (tonalidad oscura). Las coloraciones contrastantes permiten la verificación de la profundidad de penetración de los iones cloruros al concreto.

3. RESULTADOS

3.1 Resistencia mecánica

Los valores promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión a edades de 1, 7 y 28 días y de resistencia a tracción por compresión diametral, a los 28 días, están presentados en las Figura 3 y Figura 4, respectivamente.

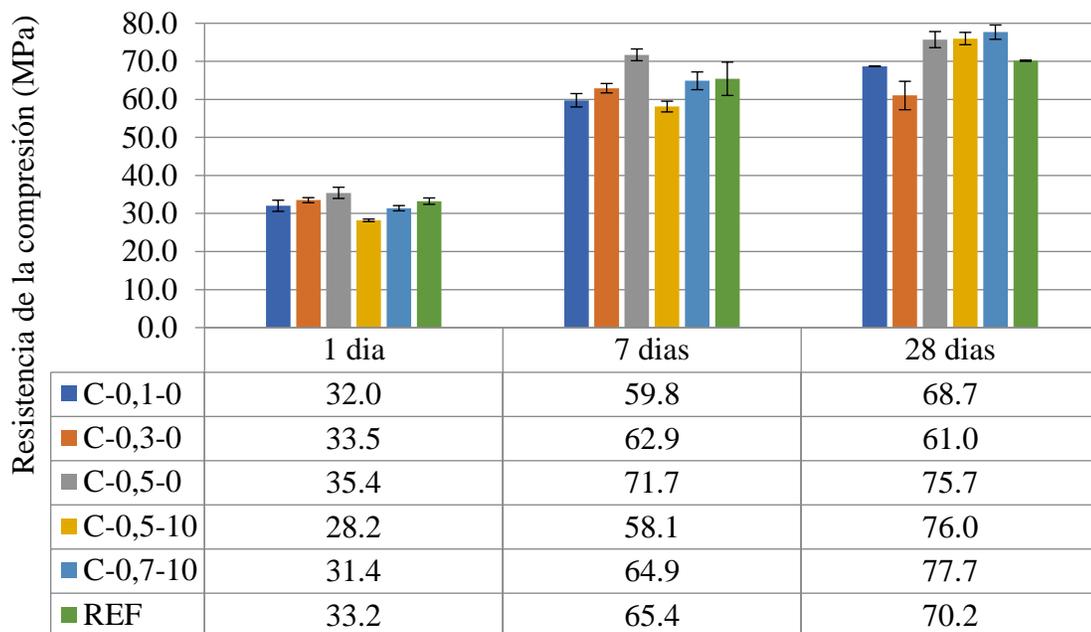


Figura 3. Resistencia a compresión a lo largo del tiempo.

Los resultados indicaron que al adicionar 0,5% de nanosílice de forma aislada a los hormigones (C-0,5-0) hubo un aumento de 9,6 y 7,1% en la resistencia a compresión al compararlos a los hormigones de referencia (REF), a los 7 y 28 días, respectivamente.

Al combinar la nanosílice con la sílice activa, se nota que en edades tempranas el concreto de referencia alcanzó mayor resistencia a compresión. Entre tanto, a los 28 días los hormigones C-0,5-10 e C-0,7-10 llegaron a 76,0 y 77,7 MPa, respectivamente, en cuanto al REF alcanzó 70,2 MPa. La mayor ganancia de resistencia a los 28 días, inclusive a los 90 días, también fue observado por otros investigadores (Senff *et al.*, 2010; Joshagani; Moeini, 2017).

No fueron observadas evidencias de un efecto sinérgico entre las adiciones, una vez que, al adicionar sílice activa a la mezcla, para una misma dosis de nanosílice (C-0,5-0 e C-0,5-10) no hubo ganancias de resistencia a compresión.

Ese comportamiento difiere de lo observado por Li *et al.* (2017a), que constataron que la adición de 2% de nanosílice en polvo provocó un aumento de 17% a la resistencia a compresión a los 28 días, mientras que para 10% de sílice activa ese aumento fue de 11%. Al combinar las dos

adiciones, 2% de nanosílice+10% de sílice activa, el aumento fue de 48%, quedando clara la existencia de un efecto sinérgico entre las adiciones.

En cuanto a la resistencia a tracción por compresión diametral (Figura 4), los resultados indicaron que el uso de las adiciones no provocó mejoras significativas, principalmente al considerar los desvíos patrón de cada muestra. Diferentemente de lo que concluyeron Ganesh *et al.* (2016), que observaron ganancias de 17% e 24% en la resistencia a tracción de hormigones a los 28 días, al incorporar 1% y 2% de solución de nanopartículas de sílice, respectivamente.

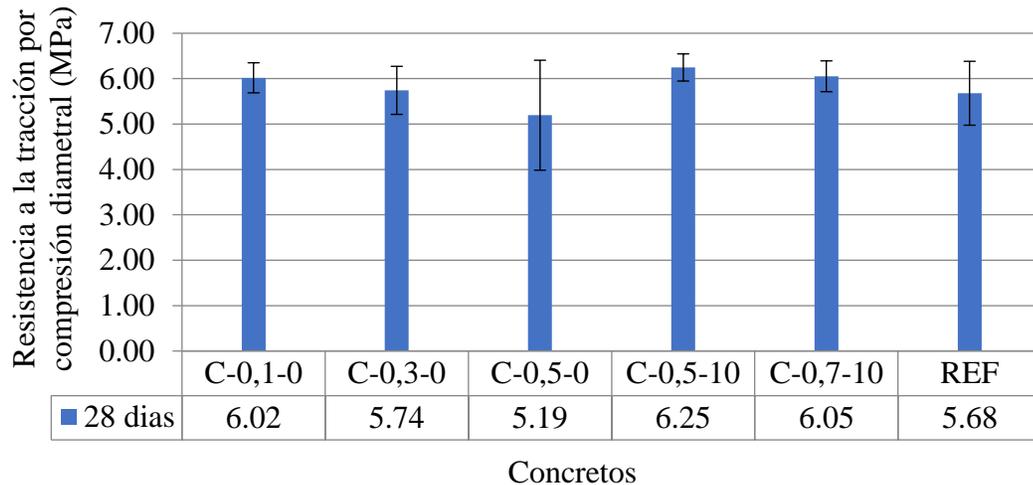


Figura 4. Resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones a los 28 días.

Vale resaltar que el hecho de que la nanosílice utilizada en este trabajo esté dispersa en superplastificante, dificulta el estudio de su incorporación en dosis más elevadas, inclusive las propias dosis recomendadas por el fabricante. Además de eso, no se sabe la real dosis de sílice presente en el material, imposibilitando la determinación de su porcentual en relación con el aglomerante.

3.2 Absorción de agua por capilaridad

Los resultados obtenidos del ensayo de absorción de agua por capilaridad permitieron graficar las curvas del capilar *versus* raíz de tiempo para cada uno de los hormigones estudiados, a lo largo de las 72 horas (Figura 5).

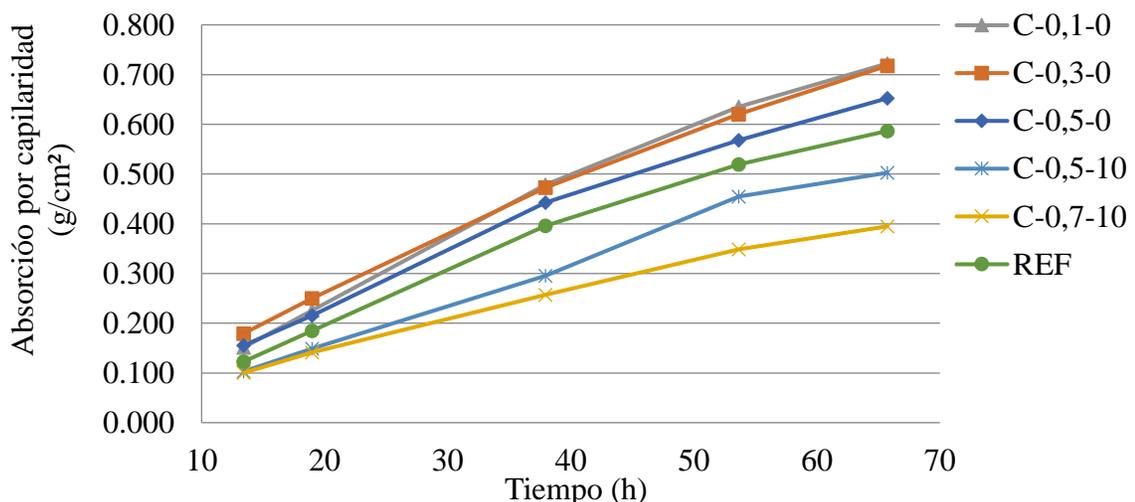


Figura 5. Absorción de agua por capilaridad de los hormigones a los 28 días.

Se observa que el uso aislado de nanosílice, en las dosis analizadas, no confirió mejoras en la absorción de agua por capilaridad de los hormigones, una vez que todos los trazos presentaron índice de absorción superiores (entre 0,652 y 0,722 g/cm²) con respecto al patrón (0,587 g/cm²). Entre tanto, al adicionar sílice activa y elevar la dosis de nanosílice para 0,7% (C-0,7-10) fue posible reducir ese índice para 0,395 g/cm².

Esos resultados indican que la sílice activa, con sus efectos filler y puzolánicos, fue capaz de refinar la microestructura de la matriz cementícea. Por otro lado, la nanosílice dispersa en superplastificante no posee los efectos físicos y químicos esperados.

Otros investigadores estudiaron los efectos de nanosílice en propiedades físicas de materiales cementíceos y tuvieron resultados positivos, con reducción de la sorción, la absorción y el índice de vacíos (Li *et al.*, 2017b; Ganesh *et al.* 2016, Joshaghani; Moeini, 2017).

Vale resaltar que, en los estudios citados, la nanosílice estaba en forma de polvo o solución. Ante esto, se cree que la dilución del nanosílice en aditivo superplastificante perjudicó la obtención de resultados positivos en este presente trabajo.

La Figura 6 están destacadas las alturas capilares máximas observadas en probetas de concreto posterior a las 72 horas de ensayo. Se observa que los hormigones que tuvieron menor índice de absorción capilar (C-0,5-10 y C-0,7-10) también presentaron menor altura, corroborando la afirmación de que la sílice activa fue eficiente en el refinamiento de la microestructura de la matriz, contrario al nanosílice, cuyos hormigones presentaron ascensión superior al concreto de referencia.

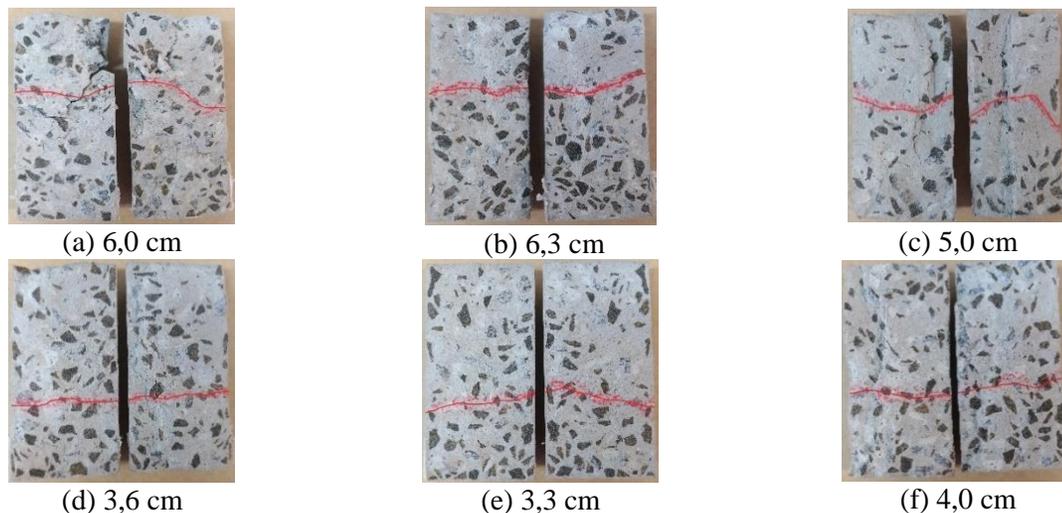


Figura 6. Probetas posteriores al ensayo de absorción de agua por capilaridad:
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10 e f) REF.

Además del efecto filler de la sílice activa, responsable por el llenado de los vacíos entre los granos de cemento y los agregados, el efecto puzolánico también ayuda en la obtención de una microestructura más densa debido a la formación de C-S-H adicional.

3.3 Determinación da frente de penetración de cloruros

El frente de penetración de cloruros en hormigones fue determinada posterior 8 y 16 ciclos semanales de secados y humectación en solución de NaCl. Los resultados están presentados en la Tabla 7. Frente de penetración dos iones cloruros y las probetas sometidas al test colorimétrico de nitrato de plata y están ilustrados en las Figura 7 Figura 8.

Tabla 7. Frente de penetración dos iones cloruros

Frente de penetración (mm)		
Concreto	Posterior 8 semanas	Posterior 16 semanas
C-0,1-0	9,4	11,7
C-0,3-0	7,6	11,4
C-0,5-0	8,6	12,3
C-0,5-10	5,4	6,4
C-0,7-10	5,6	5,1
REF	8,3	8,0

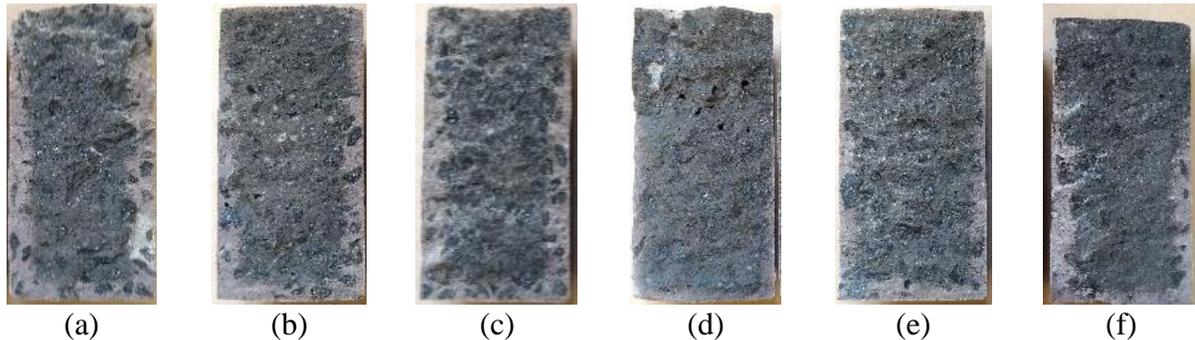


Figura 7. Probetas posteriores al ensayo colorimétrico - 8 semanas: a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

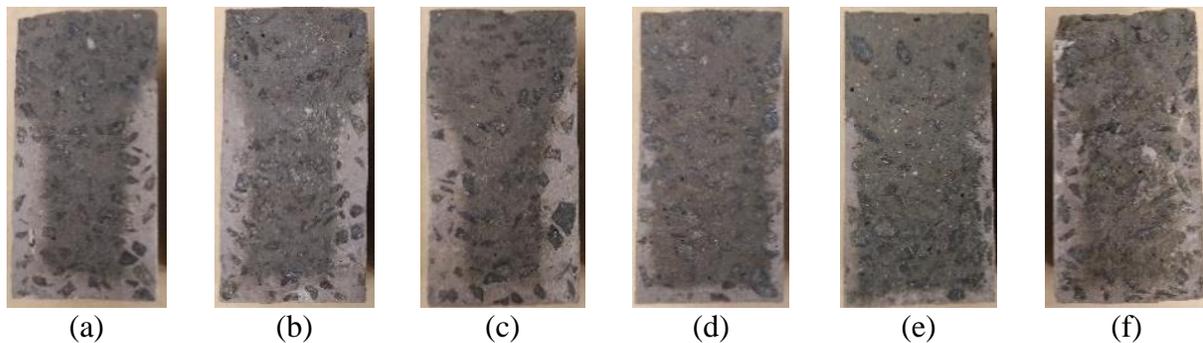


Figura 8. Probetas posteriores al ensayo colorimétrico - 16 semanas: a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

De manera general, la presencia de nanosílice no impidió la penetración de cloruros en los hormigones. Posterior a 8 semanas, los frentes de penetración de los hormigones C-0,1-0, C-0,3-0 e C-0,5-0 fueron semejantes al del concreto de referencia. Luego de 16 semanas, el concreto de referencia presentó valor menor de los que contenían adiciones.

Por otro lado, los hormigones con adición conjunta de nanosílice y sílice activa presentaron reducción del frente de penetración. Los valores obtenidos posterior a 16 semanas por los hormigones C-0,5-10 y C-0,7-10 fueron 1,6 mm y 2,9 mm menores que el concreto de referencia, respectivamente. Esos resultados eran esperados, una vez que fueron los mismos trazos que tuvieron menor índice de absorción capilar, como se discutió anteriormente.

Silva (2006) realizó los mismos ensayos en hormigones de alto desempeño con incorporación de 5 y 10% de sílice activa y luego de 16 ciclos de secados y humectación, obtuvo reducción del frente de penetración de 1,9 y 2,7 mm, respectivamente, que, comparados con el concreto de referencia, que tuvo frente de penetración de 5,7 mm.

En cuanto al uso de nanosílice, aun cuando el presente trabajo no haya obtenido resultados satisfactorios, algunas investigaciones apuntan que al utilizar 3 y 6% de una solución de nanosílice coloidal en morteros fue posible reducir la migración de cloruros en 70% e 77%, respectivamente, en comparación a los trazos de referencia, para la edad de 28 días (Joshaghani; Moeini, 2017).

Así como Ganesh *et al.* (2016), que también estudiaron la influencia de una solución de nanopartículas de sílice en la durabilidad de hormigones, por medio del ensayo de migración de cloruros. Los autores observaron que, a los 28 días, la adición de 2% de nanosílice aumentó la resistencia del concreto a la penetración de los iones agresivos. Los resultados positivos fueron atribuidos al efecto filler del nanosílice y su capacidad de llenar los vacíos presentes en el concreto, reduciendo en consecuencia, la penetración de cloruros.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se concluye que la adición de nanosílice dispersa en superplastificante, en dosis de 0,1 a 0,5%, no confirió mejoras a los hormigones en cuanto a las propiedades mecánicas y físicas, analizadas por medio de los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad. Del mismo modo la nanosílice no redujo el frente de penetración de cloruros en comparación al concreto de referencia.

Entre tanto, al ser utilizada las dosis de 0,5 y 0,7%, en conjunto con 10% de sílice activa, fueron observadas mejoras en ambas propiedades, aumentando la resistencia mecánica y reduciendo la absorción de agua por capilaridad, además de la reducción del frente de penetración de cloruros, al ser comparados al concreto de referencia.

Vale resaltar que como la nanosílice está dispersa en aditivo superplastificante, no fue posible evaluar otras dosis dentro de los límites recomendados por el fabricante. Una vez que el aumento de la dosis adicionada lleva al aumento de la consistencia, pudiendo culminar en una pérdida de cohesión y exudación de las mezclas.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Sistemas Estructurales (UFSCar); Laboratorio de Estructuras (USP) y al Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Estado de Sao Paulo, por el apoyo en la realización de los ensayos. A Holcim de Brasil S/A., a Silicon Industria y Comercio de Productos Químicos LTDA e a Dow Corning Silicio de Brasil, por los materiales donados y al grupo de pesquisa GESEC.

6. REFERENCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., Sebastiani, M. (2012): *Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes*. Construction and Building Materials, v. 35, p. 666-675. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>>
- Dal Molin, D. C. C. *Adições Minerais*. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08, p. 261-309. São Paulo: IBRACON, 2011.
- Ganesh, P., Murthy, A. R., Kumar, S. S., Rehemam, M. M. S., Iyer, N. R. (2016): *Effect of nanosilica on durability and mechanical properties oh high-strength concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 68, p. 229-236. <<http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.14.00338>>
- Ghafoori, N., Batilov, I. B., Najimi, M. (2016): *Sulfate resistance of nanosilica and microsilica contained mortars*. ACI Materials Journal, v. 113, p. 459-469. <doi: [10.14359/51688989](https://doi.org/10.14359/51688989)>
- Joshaghani, A., Moeini, M. A. (2017): *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. Construction and Building Materials, v. 152, p. 818-831. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>>
- Li, L. G., Huang, Z. H., Zhu, J., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y. (2017a): *Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar*. Construction and Building Materials, v. 140, p. 229-238. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>>
- Li, L. G., Zhu, J., Huang, Z. H., Kwan, A. K. H., Li, L. J. (2017b): *Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar*. Construction and Building Materials, v. 157, p. 337-347. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>>
- Lim, S., Mondal, P. (2015): *Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste*. Journal of Materials Science, v. 50, p. 3531-3540. <DOI [10.1007/s10853-015-8910-7](https://doi.org/10.1007/s10853-015-8910-7)>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W. L., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2010): *Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars*. Advances in Applied Ceramics, v. 109, n. 2. <DOI: [10.1179/174367509X12502621261659](https://doi.org/10.1179/174367509X12502621261659)>
- Silva, F. G. (2006): *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado) – Interunidades (IFSC – IQSC – EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos.

Columnas de concreto armado reforzados a flexo-compresión con encamisado parcial

D. R. C. de Oliveira^{1*} , I. I. R. Damasceno² , V. H. L. Branco³ 

* Autor de Contacto: denio@ufpa.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

Recepción: 23/10/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

Se investiga el comportamiento de seis columnas a flexo-compresión con sección inicial (120 x 200) mm², sección final (200 x 200) mm² y altura de 1.600 mm, reforzadas en los lados traccionados y comprimidos con revoque preexistente o no. La adherencia entre hormigón nuevo y viejo, y patrón de fisuración fueron satisfactorios. Aunque los pilares revestidos tienen el mismo comportamiento de los no revestidos, incluso cuando el área de hormigón se redujo en aproximadamente 20%, los problemas consistieron en el aplastamiento de la capa de refuerzo inmediatamente antes de la ruptura de los pilares. Este refuerzo resultó ser más adecuado cuando se realiza en la zona comprimida, a través de procedimientos convencionales con o sin capa de revoco de mortero.

Palabras clave: columnas; refuerzo parcial; encaje parcial; concreto armado.

Citar como: D. R. C. de Oliveira, I. I. R. Damasceno, V. H. L. Branco (2018), “*Columnas de concreto armado reforzados a flexo-compresión con encamisado parcial*”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 150 - 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

¹ Associated Professor, Dr., Federal University of Pará, Civil Engineering Department.

² Adjunct Prof., M.Sc., Federal University of South and Southeast of Pará, Civil Engineering Department.

³ Adjunct Prof., M.Sc., Federal Institution of Science, Education and Technology of Pará, Infrastructure Department.

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Eccentrically-compressed reinforced concrete columns strengthened with partial jacketing

ABSTRACT

The behavior of six uniaxial compression columns is investigated. Specimen featured an initial section of (120 x 200) mm², a final section of (200 x 200) mm² and height of 1.600 mm, strengthened on the tensile and compression sides with plaster or not. Adherence between new and old concrete, and cracking pattern was satisfactory. Although coated columns showed the same behavior to their respective non-coated ones even when concrete area was reduced by approximately 20%, problems consisted in the crushing of the reinforced concrete layer immediately prior to the rupture of the columns. This strengthening proved to be more adequate when undertaken at the columns' compressed zone and may be executed through conventional procedures with or without mortar coating layer.

Keywords: columns; partial retrofit; partial jacketing; reinforced concrete.

Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial

RESUMEN

Investiga-se o comportamento de seis pilares à flexo-compressão. As amostras apresentaram uma seção inicial de (120 x 200) mm², uma seção final de (200 x 200) mm² e altura de 1.600 mm, reforçadas nos lados tracionados e comprimidos com reboco pré-existente ou não. A aderência entre concreto novo e velho, e padrão de fissuração foram satisfatórios. Embora os pilares revestidos tenham o mesmo comportamento dos pilares não revestidos, mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%, os problemas consistiram no esmagamento da camada de reforço imediatamente antes da ruptura dos pilares. Esse reforço provou ser mais adequado quando realizado na zona comprimida podendo ser executado através de procedimentos convencionais com ou sem camada de argamassa de reboco.

Palabras clave: pilares; reforço parcial; encamisamento parcial; concreto armado.

1. INTRODUCCIÓN

Aun cuando las estructuras de concreto armado sean consideradas permanentes, éstas presentan problemas patológicos a lo largo de su vida útil. De hecho, algunas estructuras trabajan excepcionalmente bien, mientras otras revelan fallas prematuras. Ciertas fallas son de larga duración a pesar de la incansable búsqueda por la calidad. Metodologías para su prevención y corrección aun requieren cierto desarrollo. Guimaraes *et al.* (2016) relata que diferentes tipos de patologías pueden aparecer en la estructura, lo que, a su vez, causa varios problemas y puede hasta provocar rupturas. Cargas mayores de lo que son calculadas en la fase de proyecto, fallas en el proyecto, variaciones de humedades, procesos de corrosión del concreto armado, variaciones térmicas intrínsecas y extrínsecas al concreto, agentes biológicos y uso inadecuado del material, pueden causar problemas patológicos. Las consecuencias con un nivel inadecuado de seguridad de la estructura (estado límite último) y de condiciones de uso de la construcción (estado límite de servicio), lo que influye en las condiciones funcionales de la estructura. De acuerdo con Gillum *et al.* (2001), un desarrollo reciente en reparación y rehabilitación de estructuras de concreto consiste en capas más finas de refuerzo de concreto armado usadas como encamisado.

Teniendo en cuenta la relevancia del tema las frecuentes demandas por refuerzos estructurales en obras civiles, esta investigación pretende contribuir para la evaluación de refuerzo de columnas y

el análisis de los ensayos experimentales del comportamiento estructural y de la eficiencia del encamisado parcial de columnas de concreto armado, revestidos y no revestidos, sometidos a flexo-compresión normal. Lo expuesto anteriormente justifica el desarrollo de pesquisas sobre el comportamiento estructural del concreto armado, una vez que la técnica de encamisado es normalmente más adecuada para aumentar la resistencia a la compresión, aumento de las secciones transversales y refuerzo del concreto armado (Gomes & Appleton, 1998). Para que el revestimiento sea bien realizado, la ruptura del nuevo concreto debe ser evitada cuando la estructura regrese a las cargas de servicio.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Método de cálculo

Carga normal y momento flector son predominantes en columnas de concreto armado. Son llamados esfuerzos normales desde que produzcan tensiones normales (tracción y compresión) la sección transversal de la columna, con tasas máximas en su superficie. La situación es común y generalmente, ocurre debido a la rigidez de la conexión o la excentricidad de las fuerzas verticales causadas por las imperfecciones de las construcciones. Frecuentemente las columnas de edificios son afectadas por actividades excéntricas, de modo que una excentricidad inicial (e) debe ser tomada en cuenta en el proyecto estructural. Las columnas de edificios generalmente sufren flexo-compresión normal o inclinada debido a las conexiones entre vigas y columnas, y la posición de ellas en relación con los ejes principales de la sección transversal de las columnas.

El diagrama de iteración fue usado para calcular la resistencia a la flexo-compresión normal, siguiendo las recomendaciones de Wight & Macgregor (2009) y las prescripciones y simplificaciones de la norma ACI 318 (ACI, 2008), en concordancia con los parámetros de la NBR 6118 (ABNT, 2014). Como ejemplo de la metodología de cálculo la Figura 1 muestra una sección transversal de compresión uniaxial en la cual dos capas de concreto armado longitudinal son comprimidos, mientras la capa inferior en la sección transversal A_{s3} es traccionada, donde F_{s1} , F_{s2} y F_{s3} son fuerzas en cada capa de acero, y F_c es la resistencia a la compresión del concreto. La deformación límite adoptada tiene en consideración el aplastamiento del concreto a 3.5‰ y la fluencia del acero a 2.62‰ (ϵ_{s3} , obtenido experimentalmente) para todas las barras de la armadura.

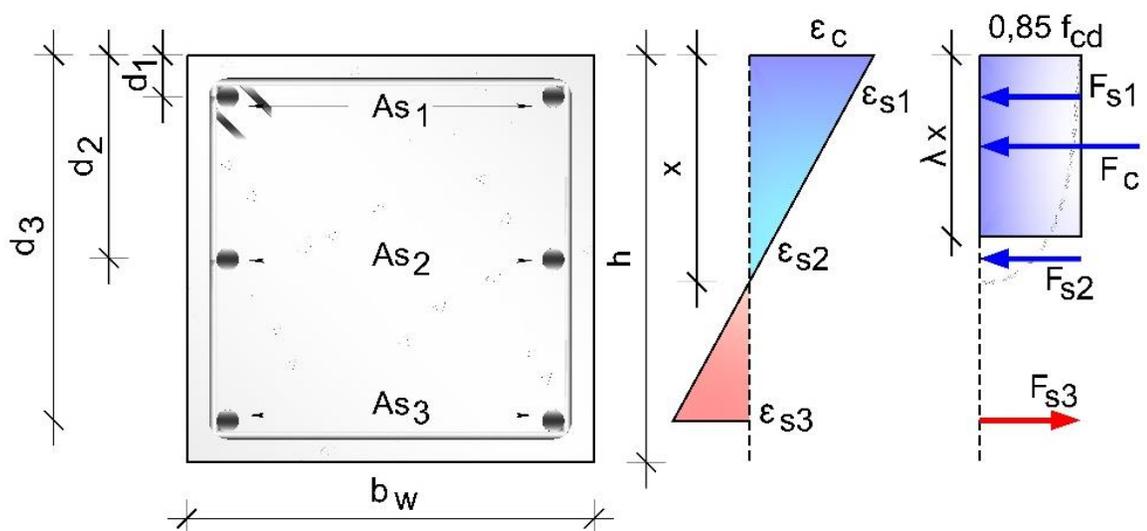


Figura 1. Tensión, deformación y fuerzas resultantes en la sección transversal de la columna.

La Ecuación 1 determina la carga normal máxima aplicada a la columna; La Ecuación 2 la resistencia a flexión tomando en consideración la flexo-compresión normal, donde: f_c es la

resistencia a la compresión; x es la línea neutra; b es el ancho de la sección; ε es la deformación del material; E el módulo de elasticidad del acero; A_s el área de acero; h la altura de la sección; F la fuerza en la capa y d es la altura útil.

Cuando la deformación límite es establecida, la iteración del diagrama puede ser desarrollada, como se muestra en la Figura 2, donde: M es el momento flector; P la carga axial. La Figura 2 muestra posibles iteraciones y planos de acción de los momentos flectores (M_x e M_y) y carga axial (P), acoplado a una simplificación para que el momento flector pueda ser considerado apenas en la dirección principal (M_x), como lo estudiado en el presente trabajo.

$$P_{RK} = 0.68 \cdot f_c \cdot x \cdot b + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{si} \cdot E_s \cdot A_{si} = F_c + \sum_{i=1}^n F_{si} \quad (1)$$

$$M_{RK} = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0.4 \cdot x\right) + \sum_{i=1}^n F_{si} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad (2)$$

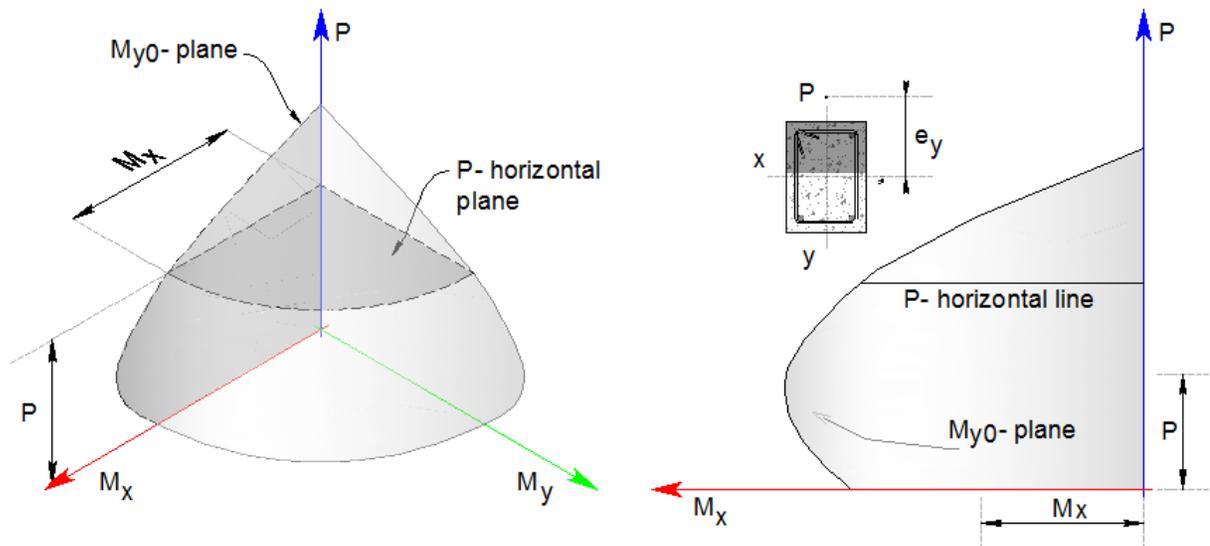


Figura 2. Diagrama de iteración para secciones sometidas a flexo-compresión (Macgregor, 1996).

Adorno (2004) desarrolló una pesquisa con columnas rectangulares de concreto armado sometidos a flexo-compresión recta, a fin de comprobar el método de cálculo desarrollado por Mello (2003). El concreto presentó una resistencia a compresión promedio de 40 MPa y el programa experimental fue compuesto por 12 especímenes, divididos en dos grupos: PSA y PCA. La serie PSA consistió en cuatro elementos y la PCA en ocho elementos. Todos tuvieron la sección transversal rectangular de (250×250) mm², sujetas a compresión y flexión. La distancia entre las armaduras el recubrimiento mínimo de concreto cumplió las recomendaciones de la NBR 6118 (2007).

Al analizar las cargas finales, es posible observar que las columnas PSA fueran aplastados con una carga mayor que la serie PCA, debido al aumento en la resistencia a la compresión. Según Adorno (2004), la variación inicial de excentricidad tuvo poca influencia en la tensión crítica de tracción que fue evidenciada por el estado avanzado de fisuración. El autor concluyó que los modelos probados mantuvieron la proporcionalidad entre la deformación longitudinal y la distancia del eje neutro hasta la ruptura, confirmando la validez del principio de Bernoulli de que las secciones

planas permanecen planas posteriores a la flexión, lo que también valida el modelo utilizado en la presente pesquisa.

Melo (2009) desarrolló un estudio experimental y numérico del comportamiento de columnas de concreto armado articuladas (40 MPa) sometidos a carga axial más momento flector. Para continuar la pesquisa desarrollada por Adorno (2004), fueron utilizadas columnas con la misma sección transversal y tasa de armadura longitudinal (1,57%). El programa experimental está compuesto por 24 columnas divididos en tres series de acuerdo con su largo, siendo la principal variable la excentricidad de la carga normal. Las columnas fueron de sección transversal de (250 x 120) mm² y distancia entre barras y recubrimiento mínimo de concreto según recomendaciones de la NBR 6118 (ABNT, 2007).

Los resultados experimentales mostraron un buen funcionamiento del sistema de ensayo, lo que, valida los procedimientos metodológicos aplicados en la presente pesquisa, con deterioro de columnas ocurriendo a media altura, como es lo esperado. Además de eso la principal variable de las pruebas realizadas fue la excentricidad, lo que mostró gran influencia en la carga última de las columnas. Una respuesta no lineal de la resistencia a flexión fue observada en función de la esbeltez y excentricidad de la aplicación de carga en columnas. Melo (2009) verificó que lo conservador de los métodos de previsión de cargas finales aumenta a medida que la excentricidad es reducida.

2. METODOLOGIA

2.1 Características generales

Seis columnas de concretos encamisados parcialmente fueron analizados y sometidos a flexo-compresión normal. Todas las columnas fueron monitoreadas por extensómetros eléctricos de resistencia, colocados longitudinalmente a la columna para registrar la deformación del concreto y del acero. Relojes comparadores digitales fueron utilizados para monitorear los desplazamientos. Las variables fueron la posición del encamisado parcial, y la presencia o ausencia de capa de revoco. A sección transversal, la tasa de armadura longitudinal, carga de compresión del posicionamiento de los extensómetros utilizados en el montaje de los ensayos, fueron constantes para todas las columnas.

La excentricidad de la carga axial fue de 100 mm medida a partir del eje longitudinal de la columna. Las columnas fueron divididas en dos grupos: uno reforzado en la zona de compresión (PCR, PCS y PCSR) y otro grupo reforzado en la zona de tracción (PTR, PTS y PTSR). Una columna de referencia fue vaciada en cada grupo, uno simulando el refuerzo de la columna sin remoción del revestimiento de la sección original y la otra con la remoción completa del revestimiento. Las columnas de referencia presentaron una sección transversal de (200 × 200) mm² y largo total de 1.600 mm, con índice de esbeltez de aproximadamente 28. Las columnas reforzadas tenían una sección inicial de (120 × 200) mm² y largo total de 1.600 mm, con 80 mm de capa de refuerzo. Posterior al refuerzo, las columnas muestraron una sección transversal final idéntica a la de las columnas de referencia. La Figura 3 muestra el tamaño de las columnas y el consuelo de concreto hecho para evitar la fisuración prematura del concreto en los especímenes reforzados.

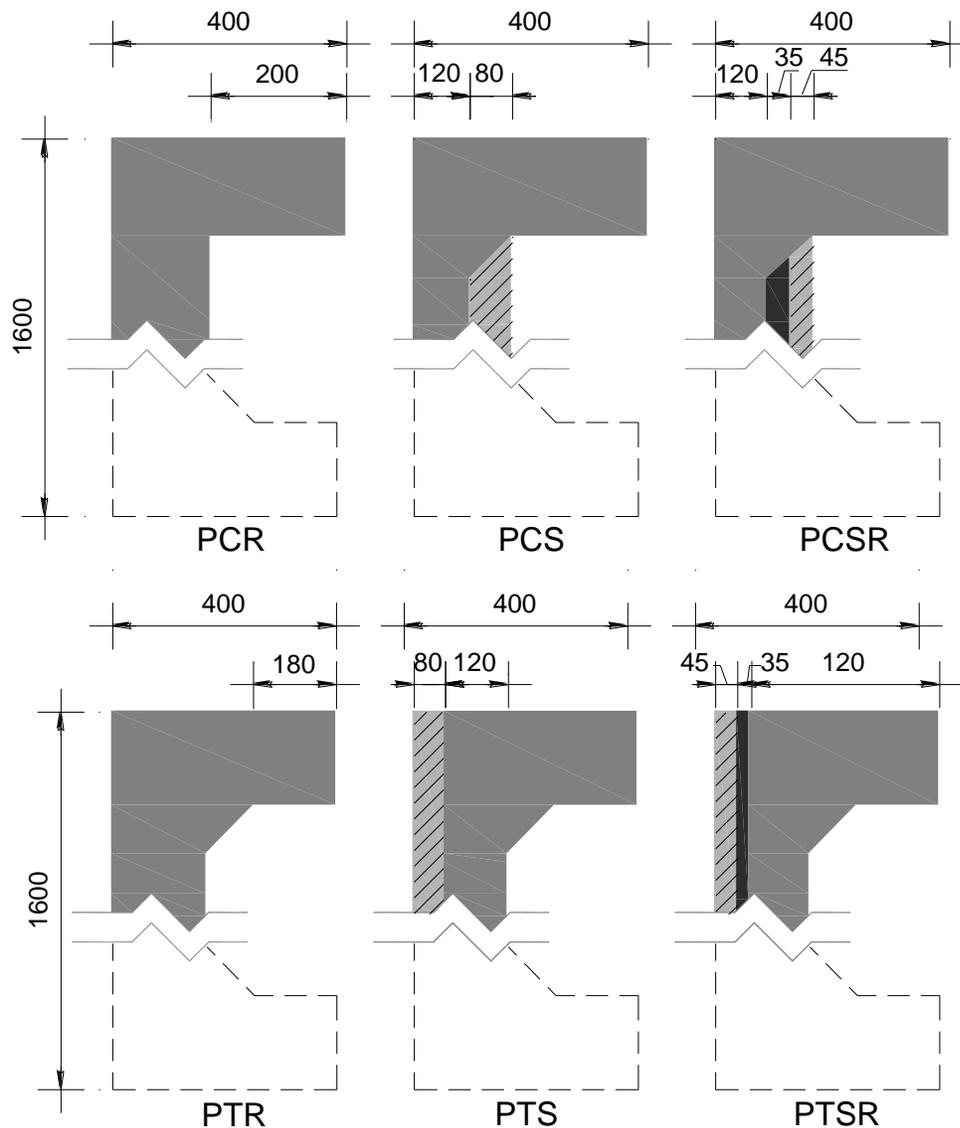


Figura 3. Dimensiones de las columnas.

2.2 Armaduras

Representando una situación común de obra, la armadura longitudinal de las columnas de referencia fue de 6 \varnothing 10,0 mm ($A_s = 4.71 \text{ mm}^2$), con estribos de \varnothing 5.0 mm separados a cada 100 mm de eje a eje, y \varnothing 5,0 mm a cada 50 mm en las extremidades. Además de eso, fueron utilizados estribos abiertos adicionales, de \varnothing 5,0 mm a cada 100 mm, posteriormente fijados en el concreto endurecido fijados con adhesivo epóxico para auxiliar en la adherencia entre concreto nuevo y viejo. La armadura inicial de todas las columnas fue de \varnothing 10.0 mm ($A_s = 314 \text{ mm}^2$), con dos barras longitudinales adicionales a la armadura, coincidiendo con el número de barras usadas de la columna de referencia sin refuerzo, es decir 6 \varnothing 10.0 mm ($A_s = 4.71 \text{ mm}^2$). La armadura transversal empleada en las columnas reforzadas fue la misma especificada para las columnas de referencia (Figura 4).

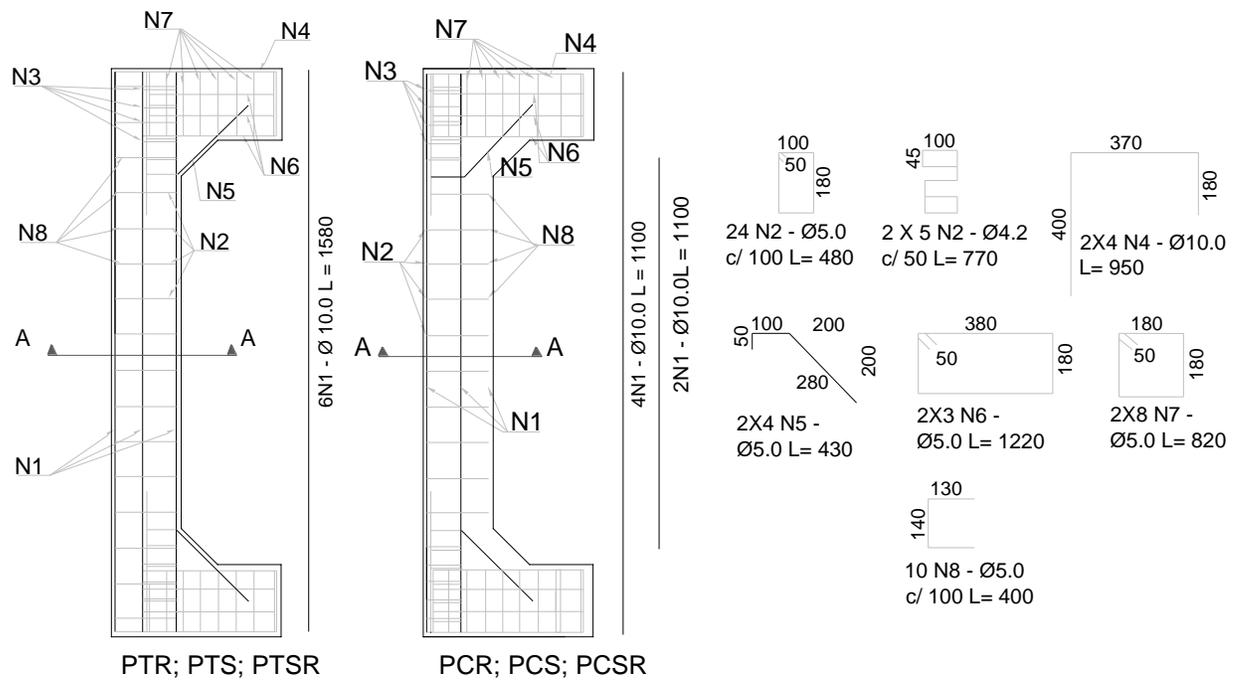


Figura 4. Armadura de las columnas.

2.3 Instrumentación

3.3.1 Concreto

Para el refuerzo en la región de tracción y compresión de las columnas, el refuerzo transversal (estribos abiertos) fue fijado al concreto endurecido con un adhesivo estructural a base de epoxi en orificios de 60 mm de profundidad. Estos son estribos de Ø 5,0 mm a cada 100 mm, simulando procedimientos en obras civiles. Los extensómetros fueron instalados al concreto posteriormente a la fijación de los estribos abiertos (Figura 5). Un revestimiento de mortero de cemento-arena fue aplicado en las columnas PTRS y PCSR antes de la instalación de los estribos abiertos, por eso otro extensómetro fue colocado en la superficie del revestimiento. Las armaduras longitudinales (2 Ø 10,0 mm) fueron posicionadas colocando los moldes de madera para complementar el refuerzo, y para el vaciado del concreto. La instrumentación de la superficie del concreto fue finalizada con la colocación de un extensómetro en la capa de refuerzo.



Figura 5. Extensómetros instalados al concreto (PTS; PTRS; PCS; PCSR respectivamente).

3.3.2 Armaduras

Los extensómetros eléctricos de resistencia fueron usados en barras de acero para monitorear deformaciones durante las pruebas. La Figura 6 muestra el posicionamiento de los sensores en las columnas PTR, PTS y PTRS y la Figura 7 exhibe la colocación de los sensores en las columnas PCR, PCS y PCSR. Los extensómetros fueron posicionados a mediana altura de las columnas.

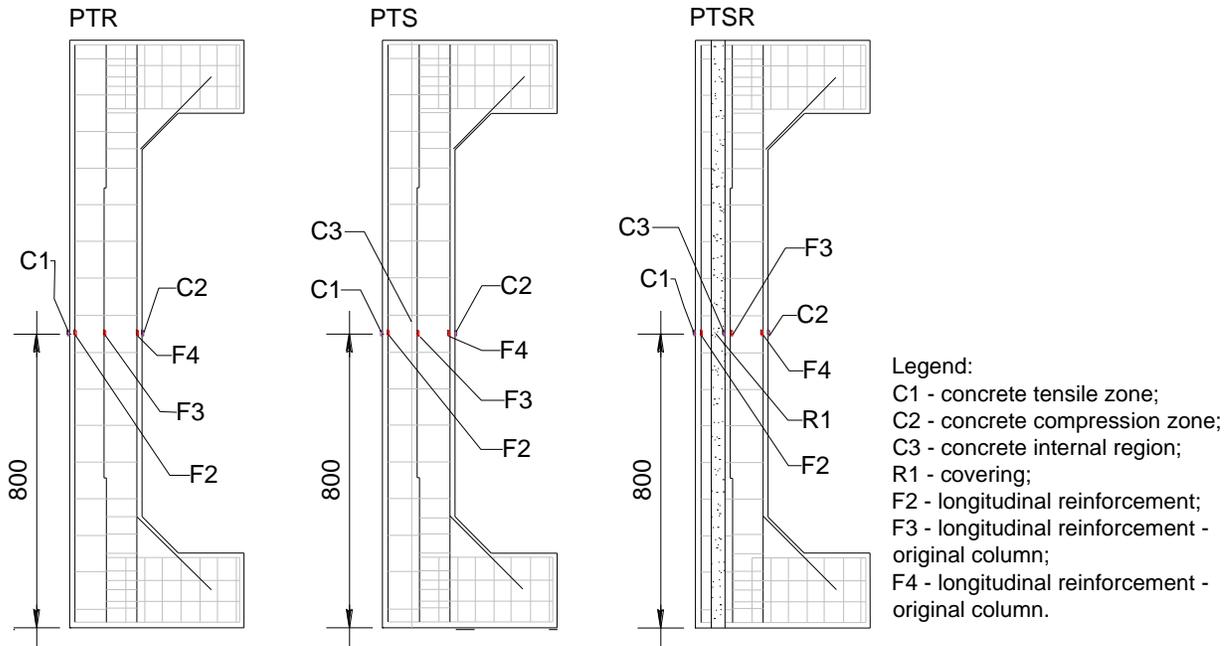


Figura 6. Extensómetros en las barras y concreto de las columnas reforzados de la zona traccionada.

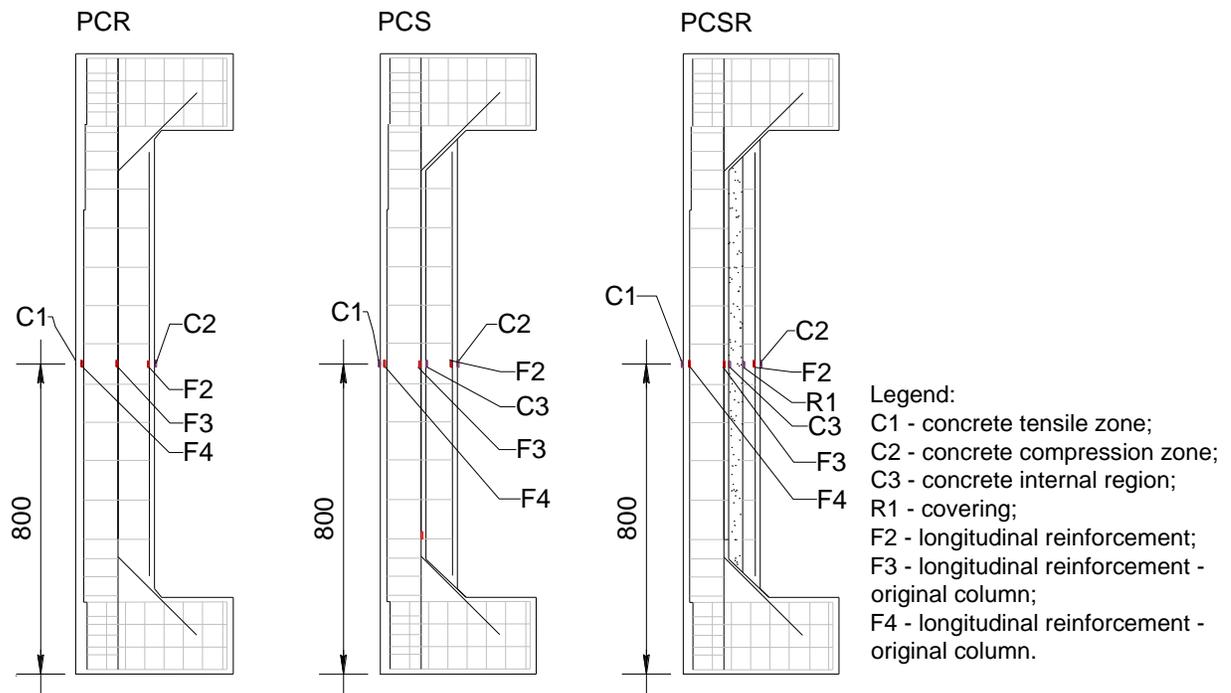


Figura 7. Extensómetros en las barras y concreto de las columnas reforzados de la zona comprimida.

2.4 Sistema de ensayo

La Figura 8 detalla la configuración del sistema de ensayo usado en el análisis experimental de las columnas. El sistema consta de un pórtico metálico muy rígido fijado al piso de reacción, un gato hidráulico de 2000 kN accionado por una bomba hidráulica para cargar y una célula de carga de 2000 kN con precisión de 0,5 kN, conectados a una célula de carga con indicador digital para registro de carga. Las columnas fueron apoyadas con aparatos de segundo género, simulando bisagras colocadas excéntricamente al eje longitudinal de las piezas y viabilizando la flexo-compresión recta esperada. Las deformaciones fueron registradas por un sistema de adquisición de datos conectado al computador, a través de extensómetros instalados en las barras de acero y por aquellos fijados a la superficie de concreto.

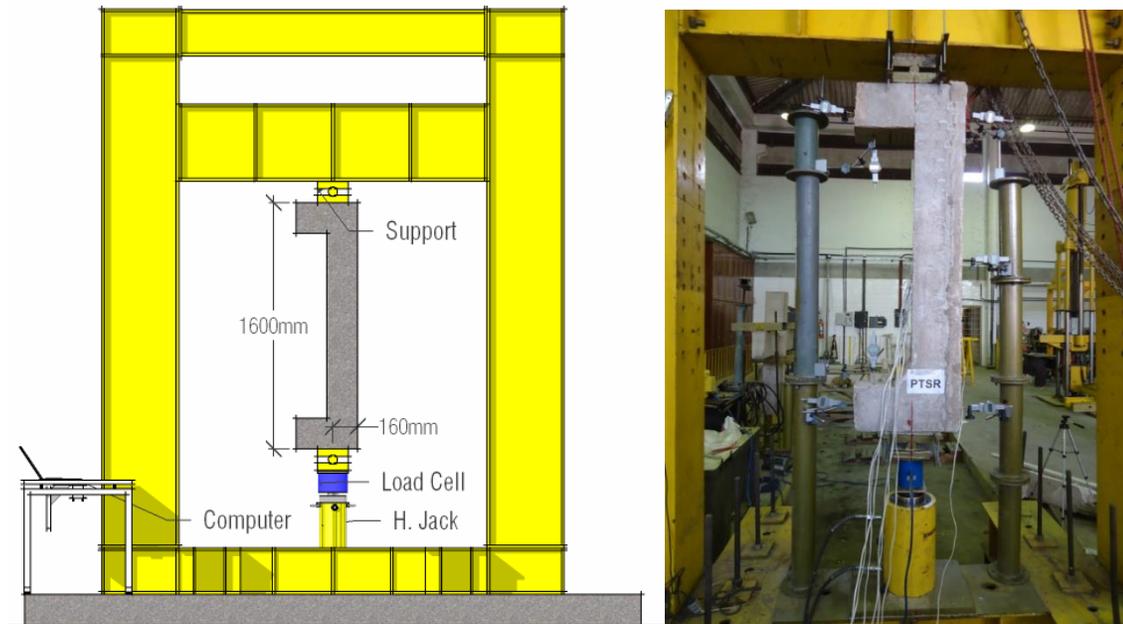


Figura 8. Sistema de ensayo.

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

3.1 Acero y concreto

Las columnas fueron vaciadas simultáneamente. Las columnas fueron reforzadas 28 días posterior a la aplicación del revestimiento. Tres probetas cilíndricas fueron vaciados en cada etapa y ensayados de acuerdo con la norma NBR 5739 (ABNT, 2007) la resistencia a la compresión (f_c) del friso y del concreto fueron respectivamente 7.0 MPa y 32.0 MPa. El módulo de elasticidad del concreto (E_{cs}) fue equivalente a 28.1 GPa. En el caso de las barras de acero, los ensayos fueron realizados de acuerdo con la NBR 8522 (ABNT, 2008). La tensión de fluencia (f_{ys}) y el módulo de elasticidad (E_s) fueron 662.0 MPa y 218.4 GPa para las barras de 5,0 mm y 548.1 MPa y 209.2 GPa para las barras de 10.0 mm de diámetro, respectivamente.

3.2 Cargas y modos de ruptura

Las columnas de referencia PTR (columna de referencia reforzada a tracción) y PCR (columna de referencia reforzado a compresión) revelaron el comportamiento frágil del concreto en la zona de compresión próxima a la luz intermedia. La columna PCR también mostró falla cercana a la zona de compresión. Las columnas reforzadas también resultaron en diferentes modos de ruptura, aun cuando demostraron un comportamiento monolítico durante los ensayos hasta inmediatamente antes de fallar.

La columna reforzada PTS presentó comportamiento monolítico hasta justo antes de fallar, aunque en esta ocasión, el desplazamiento del refuerzo haya ocurrido por la zona próxima a la extremidad superior. Un comportamiento semejante fue registrado para la columna PTSR con recubrimiento de friso. La columna PCS, reforzada en la zona de compresión, reveló comportamiento monolítico hasta la falla de la columna, sin pérdida ni fisuración de la capa de refuerzo o la interfaz del concreto.

Ocurrió el aplastamiento del concreto en la zona próxima a la superficie de las columnas. La columna PCRS mostró un patrón de fisuración en la superficie entre el refuerzo y el sustrato inmediatamente antes de la falla. La Tabla 1 presenta las cargas de ruptura, la deformación máxima de tracción en el acero (ϵ_s) y la deformación máxima de compresión en el concreto (ϵ_c), la carga normal última (N_u), y la comparación entre carga última y carga de referencia (N_{Ref}) de las columnas PTR y PCR, y los modos de ruptura de las columnas. Los modos de ruptura fueron adoptados tomando en consideración las deformaciones y modos de fisuración, observados experimentalmente. La columna de referencia PTR rompió con la carga normal de 340 kN, revelando deformaciones del acero mayores que la de fluencia ($\epsilon_s \geq \epsilon_{ys} = 2.62\%$). La columna de referencia PCR rompió con carga normal de 400 kN, correspondiendo aproximadamente 120% da carga última presentada por la columna PTR. Las columnas reforzadas la tracción PTS y PTSR presentaron ruptura por desplazamiento de la capa de refuerzo estructural. Además de ello, las columnas reforzadas a compresión PCS y PCRS rompieron con la fluencia del acero en la zona de tracción y de aplastamiento de concreto en la zona de compresión, sin señales de separaciones registrados.

Tabla 1. Cargas y modos de ruptura.

Columnas	Zonas reforzadas	Revestimiento	ϵ_s	ϵ_c	N_u	N_u/N_{Ref}	Modos de ruptura
			(%)	(%)	(kN)		
PTR	-	No	3.2	3.6	340	-	Fluencia y aplastamiento
PTS	Tracción	No	2.4	1.9	300	0.88	Ruptura del refuerzo
PTSR	Tracción	Si	2.8	2.3	320	0.94	Ruptura del refuerzo
PCR	-	No	4.9	1.9	400	-	Aplastamiento del concreto
PCS	Compresión	No	4.0	3.5	400	1.01	Fluencia y aplastamiento
PCSR	Compresión	Si	3.4	2.0	370	0.92	Fluencia

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Tabla 2 presenta la carga de ruptura experimentales (N_u), Momento flector experimental (M_u), excentricidad inicial (e_i) y final (e_f), carga de ruptura teórica (N) y resistencia a flexión (M) estimadas por el diagrama de iteración, a relación entre carga de ruptura experimental y carga estimada (N_u/N) y la relación entre momentos flectores experimentales y teóricos (M_u/M). Os resultados para los momentos flectores teóricos fueron satisfactorios para las columnas PTR, PTS y PTSR, con una tasa media de 1.09 para M_u/M ; esa misma tasa alcanzó 1.36 para las columnas PCR, PCS y PCRS. El revestimiento de revestimiento de mortero no fue significativamente dañado en ambas condiciones de refuerzo. En otras palabras, las columnas alcanzaron y fueron más allá de los estimativo. En relación con las cargas normales, las columnas dieron cargas experimentales inferiores al estimado teórico. El resultado promedio (0,88) para N_u/N fue mejor para las columnas reforzados en la zona de compresión.

La Figura 9 muestra un diagrama de iteración (basado en MacGregor & Ibrahim, 1996) de la sección transversal común a todas las columnas y sus respectivas resistencias experimentales finales. Para cualquier excentricidad existe un par único (M/N), y graficando estas series de pares correspondiendo a una excentricidad diferente, se obtiene el diagrama de iteración.

El eje horizontal muestra los valores de los momentos flectores y el eje vertical los valores de la carga normal, de modo que las líneas radiales muestran una excentricidad constante. Cuanto más verticales tienden las líneas radiales menor la excentricidad llevando a la ruptura por compresión, entonces cuanto más horizontales tienden las líneas radiales mayor la excentricidad llevando a fase de ruptura por tracción. El trazado de la trayectoria lineal de la carga muestra una ruptura proporcional bien balanceada entre acero y concreto de la sección transversal de las columnas de acuerdo con la NBR 6118 (2014). Cuando las trayectorias de carga fueron comparadas el efecto de segunda orden, asociado a la no linealidad física, disminuyó las estimaciones de resistencia última de carga normal hasta en 28%, mientras una reducción de apenas 5% ocurrió.

Lo expuesto antes demuestra que aún con bajos índices de esbeltez, ese efecto debe ser tomado en cuenta debido a la disminución de la seguridad de las columnas. Mientras la Figura 10 muestra columnas post-fisuración la Figura 11 detalla las zonas dañadas. Las columnas reforzadas en la zona de tracción mostraron desplazamiento de la capa de concreto próximo a la extremidad da columna, debido al arrancamiento de los estribos con la ruptura de la columna. La falla de la zona comprimida en las extremidades de la columna PCR también puede ser notada.

Tabla 2. Comparación entre resultados teóricos y experimentales.

Columnas	f_c (MPa)	N_u (kN)	M_u (kN·m)	e_i (mm)	e_r (mm)	N (kN)	M (kN·m)	N_u/N	M_u/M
PTR	32	340	48.3	100	142	442.7	39.6	0.77	1.22
PTS		300	39.3		131			0.68	1.00
PTSR		320	42.2		132			0.72	1.07
PCR		400	56.4		141			0.90	1.42
PCS		400	56.0		140			0.90	1.41
PCSR		370	48.8		132			0.84	1.23

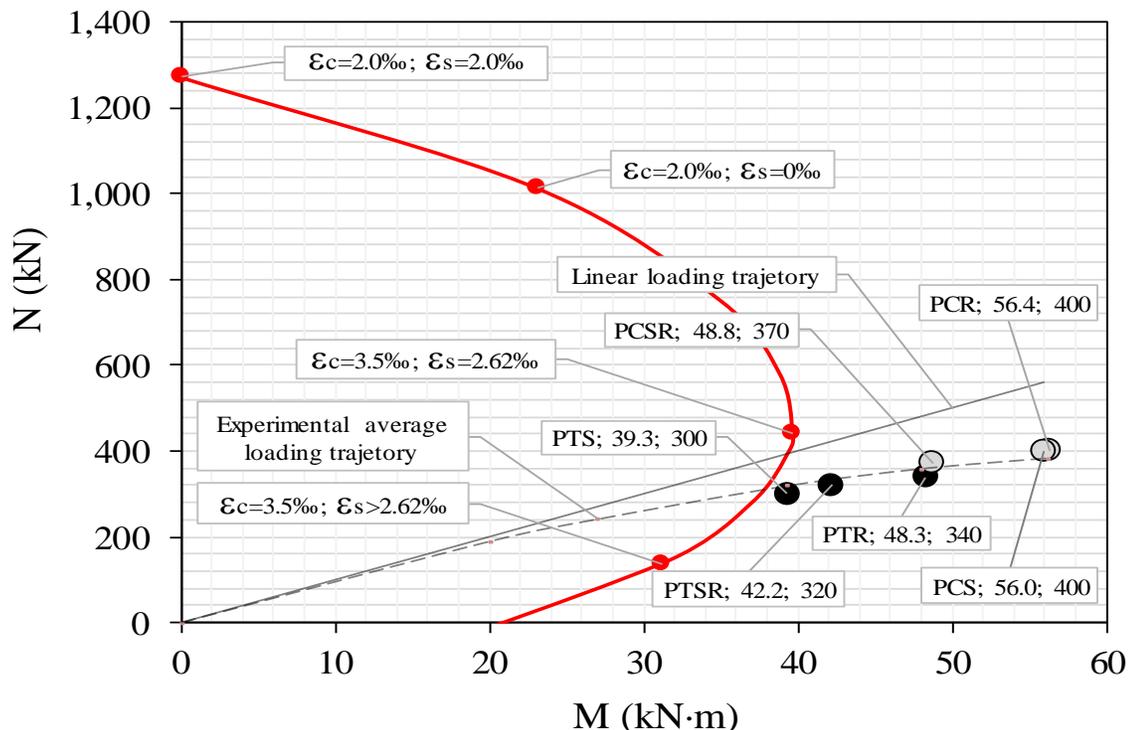


Figura 9. Resultados del diagrama de iteración.



Figura 10. Columnas posteriores a la ruptura.



Figura 11. Detalle de las columnas luego de la ruptura.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas brindan los resultados experimentales de seis columnas de concreto armado reforzadas en diferentes zonas, superficie de tracción y compresión, sometidos a flexo-compresión normal. Los resultados fueron analizados tomando en consideración las diferentes fuerzas de compresión de las columnas, la zona de refuerzo y los desplazamientos máximos en la zona central de las columnas. El desplazamiento máximo de las columnas alcanzó 44 mm, dentro de las estimativas de fallas y elaboración del diagrama de iteración.

Las columnas reforzadas PTS, PCS, PTRS y PCSR mostraron un comportamiento similar, sin deformaciones evidentes de la superficie original del concreto, lo que indica que el concreto entre las capas de refuerzo no fue aplastado. El revestimiento aplicado en la superficie de la sección original de la columna PTRS no sufrió grandes deformaciones, al contrario de la columna PCSR.

Los resultados fueron satisfactorios, pues la columna que presentó mayor pérdida, la columna PTS, tuvo una pérdida promedio de 35%.

Las columnas PCR, PTR, PTS y PTSR presentaron resultados más allá de las expectativas, con pérdida máxima de 32% para la columna PTS, la única sin revestimiento de friso, con desplazamientos inmediatamente antes de la ruptura. Las columnas de referencia y columnas reforzadas a compresión tuvieron el mejor desempeño entre todas las columnas analizadas. Lo mencionado antes fue corroborado por el análisis hecho en el diagrama de iteración. Las columnas con revestimiento PTSR y PCSR presentaron un comportamiento semejante al de las no revestidas (PTS y PCSR), así como cuando el área de concreto fue reducida en aproximadamente 20%. el encamisado parcial sujeto a flexo-compresión se mostró más adecuado cuando se realizó en la zona comprimida de columnas y pudiendo ser ejecutado a través de procedimientos convencionales de refuerzo. En relación con la remoción o no del revestimiento del friso, los ensayos mostraron una influencia muy pequeña en la resistencia de las columnas y comportamiento semejante al de las columnas sin revestimiento, habiendo desplazamiento justo antes de la ruptura de las piezas.

6. REFERENCIAS

- Adorno, A. L. C. (2004), *“Análise Teórica e Experimental de Pilares em Concreto Simples e Armado sob Flexo-Compressão Reta”*, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 300.
- American Concrete Institute (2008), *ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de elasticidade e diagrama tensão-deformação*, Rio de Janeiro.
- Comite Euro-International Du Beton (1983), *Bulletin d’Information n. 162: Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign)*, London.
- Comite Euro-International Du Beton (1993), *Model Code 1990: Design Code*, London.
- Gillum, A. J., Shahrooz, B. M., Cole, J. R. (2001), *Bond strength between sealed bridge decks and concrete overlays*, ACI Structural Journal, p.13.
- Gomes, A., Appleton, J. (1998), *Strengthening of Reinforced Concrete Structures by use of Jacketing*, RPEE, p.67.
- Guimarães, G. N., Ferreira, D. B., Gomes, R. B., Carvalho, A. L. (2016), *Behavior of Reinforced Concrete columns strengthened by partial jacketing*, Ibracon Structures and Materials Journal, p. 155-159. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100002>
- Macgregor, J. G., Ibrahim, H. H. H. (1996), *Tests of eccentrically loaded high-strength concrete columns*, ACI Structural Journal, pp. 585 - 594.
- Mello, E. L. (2003), *“Concreto armado: resistência limite à flexão composta normal e oblíqua”*, 1ª Ed., Finatec UnB, Brasília, Brasil, p.113.
- Melo, C. E. L. (2009), *“Análise Teórica e Experimental de Pilares de Concreto Armado Submetidos à Flexo-compressão Normal”*, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 157.
- Wight, J. K., Macgregor, J. G. (2009), *“Reinforced Concrete: Mechanics and Design”*. Pearson Education, New Jersey, p.516.

Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas

W. Martínez^{1,2,*} , A. A. Torres-Acosta^{3,4} , E. M. Alonso-Guzmán^{1,2,5} , H. L. Chávez^{1,6} ,
C. Lara¹ , A. Bedolla⁵ , H. Z. López⁷ , J. L. Ruvalcaba⁸ 

*Autor de Contacto: wilfridomartinezmolina@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

Recepción: 24/10/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El objetivo es cuantificar los valores de los diferentes colores obtenidos en arcillas con adiciones, comparados contra una arcilla base. Se explora la apreciación estética, en base al color de las arcillas con diferentes adiciones usando arcilla del Banco Santiago Undameo, México. Las adiciones son yeso, cal, mucílago de cactus opuntia, cemento portland e hidróxido de sodio. Los porcentajes en peso fueron 2, 4, 6, 8 y 10%. Los mejores comportamientos colorimétricos fueron los resultados obtenidos del cemento portland al 6%, hidróxido de sodio al 4%, cal y yeso al 8% y mucílago de cactus opuntia blanco con porcentajes al 4 y 8%. Algunas construcciones donde se emplearon estos materiales arcillosos son: Casas Grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco; Yácatas en Tzintzuntzán, entre otros.

Palabras clave: arcilla; colorimetría; adiciones; restauración.

Citar como: W. Martínez, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez, C. Lara, A. Bedolla, H. Z. López, J. L. Ruvalcaba (2018), “Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 163 - 177, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

¹Departamento de Materiales, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

²Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

³UMQ, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 76000

⁴IMT-SCT, Sanfadila, Querétaro, México, 76000

⁵FArq-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

⁶Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

⁷FArq-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, México, 68000

⁸Laboratorio LANCIC, IF-UNAM, Ciudad de México, México 04510

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Colorimetry of modified clays with mineral and organic additions

ABSTRACT

The objective of this investigation was to quantify the colorimetric values of different clays with some additions. Exploring the aesthetic appreciation, based on the clay color, of different additions percentages (by clay mass) with Santiago Undameo Bank, Mexico, clays as main matrix. Clay was kaolinite and the additions were gypsum, lime, opuntia cactus mucilage, portland cement, and sodium hydroxide. The addition percentages were 2%, 4%, 6%, 8% and 10%. The best colorimetric performances were obtained from Portland cement at 6%, sodium hydroxide at 4%, lime and gypsum at 8% and opuntia cactus mucilage at 4% and 8%. Some buildings where these clay materials were used are: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, among others.

Keywords: clay; colorimetry; additions; restoration.

Colorimetria de argilas modificadas com adições minerais e orgânicas

RESUMO

O objetivo é quantificar os valores das diferentes cores obtidas em argilas com adições. Exploramos a apreciação estética de diferentes adições e porcentagens de argilas do Banco Santiago Undameo, no México. As adições são gesso, lima, mucilagem de cítrica de opuntia, cimento portland e hidróxido de sódio; os percentuais em peso da argila são 2, 4, 6, 8 e 10%; os melhores comportamentos colorimétricos foram obtidos a partir de cimento portland a 6%, hidróxido de sódio a 4%, lima e gesso a 8% e mucilagem de branco opuntia cactus com porcentagem de 4% e 8%. Alguns edifícios onde esses materiais de argila foram utilizados são: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, entre outros.

Palavras chave: argila; colorimetria; adições; restauração.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la restauración, es muy importante determinar la pérdida de la intensidad del color de los materiales utilizados para restaurar o conservar, ya que la observación subjetiva puede conducir a errores en la apreciación de las tonalidades.

Debido a su disponibilidad y facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades de aplicación, las arcillas son ampliamente utilizadas en la construcción y la alfarería. Debe tenerse presente que la restauración de los edificios históricos es una intervención que busca ante todo la recuperación respetuosa de dicho patrimonio cultural, por lo que requiere de especialistas en la materia para la elaboración de los proyectos, la realización de las investigaciones pertinentes y de los análisis necesarios, la dirección y supervisión de la obra, con el fin de que las intervenciones propuestas en el proyecto se apliquen en la obra de manera correcta, respetuosa, socialmente responsable.

1.1 Antecedentes

La presente investigación se realizó para complementar los estudios de construcciones elaboradas a base de tierra cruda, adobes, lo que tiene relevancia en cuanto a su conservación y restauración en México, Latinoamérica y el mundo entero, ya que existe una cantidad considerable de artefactos e inmuebles con gran valor cultural elaborados a base de este material, especialmente del preclásico y el epiclásico (Cuéllar López, 2014).

El banco de arcilla para extraer el material de estudio se eligió en virtud de que en la ribera del lago de Pátzcuaro (Pueblo Mágico), México, existen importantes templos católicos patrimoniales de la colonia, construidos con mamposterías mixtas de arcilla, ignimbritas y tobas, con proporciones concebidas según los tratadistas europeos Vitrubio, Palladio y Alberti, pero con tecnología histórica modificada por el grupo étnico Purhépecha. Ejemplos de este tipo de construcciones son la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, los templos de Janitzio, Jeráhuaro, Tzintzuntzán, Quiroga, Santa Fe, Ihuatzio, Cucuchucho, Napízaro, Erongarícuaro, Ichupio, San Andrés, San Jerónimo y otros.

Las arcillas no son materiales translúcidos ni incoloros, suelen presentar colores que van desde el blancuzco hasta el negro (Eleoterio et.al., 2016), pasando por ocres, cafés, rojizos, grises; menos común, pero verdes también. Las arcillas se usaban también en pinturas de decoración para colorear (Rathossi et.al., 2010; Lin et.al., 2014; Viscarra et.al., 2009; Hu et.al., 2007). Los colores rojizos y ocres son debidos a los óxidos de hierro presentes en las diferentes arcillas (Mahmoudi et.al., 2016; Hradil et.al., 2016; Valanciene et.al., 2010; Li et.al., 2015).

Las arcillas pueden ser minerales cristalinos como el Cuarzo, pero con magnitudes $\leq 2 \mu\text{m}$ y entonces se consideran como minerales arcillosos por encontrarse en sedimentos arcillosos (Özkan y Zeliha, 2016). Su estructura cristalina laminar les permite presentar cambios volumétricos higroscópicos y gran área superficial. Las arcillas son materiales plásticos, expansivos y contráctiles en función de su humedad, por lo cual se busca modificar este comportamiento con diferentes materiales adicionados para evitar los cambios volumétricos, y se les conoce como estabilizantes volumétricos o sólo se les llama estabilizantes. La literatura habla de algunos estabilizantes como por ejemplo, la cal, que reduce la expansión-contracción del material, sugiriendo valores máximos de los mismos en porcentaje del 15 % del peso de la arcilla. Los estabilizantes se emplean también dado que las arcillas son solubles en agua y tienen poca durabilidad frente al ataque del medio ambiente (lluvia, sol, radiación solar, humedad capilar, precipitación pluvial, vientos dominantes, etc.), a menos que se sometan a temperaturas que las conviertan en cerámicos, que son materiales más estables física y mecánicamente hablando (Özkan y Zeliha, 2016). Se han utilizados materiales estabilizantes como: cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros, estos materiales modifican las propiedades físico-químicas de las arcillas reduciendo su expansión ante la presencia de agua (López et.al, 1999).

Se tienen otros materiales estabilizantes como: cal (Anikwe et.al., 2016; Zhang et.al., 2015; Hotineanu et.al., 2015; Khemissa y Mahamedi, 2014; Modarres y Nosoudy, 2015; Sangiorgi et.al., 2016), cemento (Vali Vakili et.al., 2016; Wu et.al., 2016; Mardani-Aghabaglou et.al., 2015; Zak et.al., 2016; Gupta et.al., 2017), hidróxido de sodio (sosa cáustica) (Yaowu et.al., 2017; Cong et.al., 2015;; Carrol et.al., 1971), mucílago de cactus opuntia blanco y yeso (Flores Rentería, 2010; Olguín Domínguez, 2008; Velázquez Pérez, 2015; Ahmed et.al., 2014; Kuttah y Sato, 2015; Ahmed y Ugai, 2011). Estos investigadores encontraron como resultado de sus estudios materiales con menores cambios volumétricos y colores similares para la elaboración de adobes y morteros para la reconstrucción del patrimonio cultural, sustentables y más afines con el medio ambiente. La adición de macrofibras orgánicas a las arcillas no modifica sustancialmente el color, su principal beneficio estriba en soportar solicitaciones dinámicas y meteóricas (Mattone, 2005), que no es el objetivo del presente trabajo.

De igual forma, en un estudio previo se utilizaron varias adiciones con contenidos de 1% a 10% en peso de la arcilla. Valores superiores al 10% resultaron en cambios de color a simple vista. Los menores cambios se observaron con porcentajes de hasta el 10% en peso de la arcilla (Flores Rentería, 2010; de León Ambrosio, 2017; Flores Ponce 2018). Se observó que no hubo mayores cambios estéticos y mecánicos significativos entre las parejas: 1% y 2%, 3% y 4%, 5% y 6%, 7% y 8%, 9% y 10%.

El objetivo es dotar de estabilidad volumétrica a las arcillas estudiadas para que puedan ser utilizadas con fines de restauración, principalmente, pero teniendo una alteración mínima en las propiedades colorimétricas con respecto a la arcilla original.

1.2 Análisis Colorimétrico

La cuantificación de la colorimetría es una prueba no destructiva (Gómez 2008; Johnston, 2001; Lamb and Bourriau, 1995), que afortunadamente puede realizarse también in situ, para los casos de inmuebles patrimoniales.

Existen múltiples sistemas para medición del color como son: Münsell (Albert Henry Münsell, 1915), Ostwald (Friedrich Wilhelm Ostwald, Ciencia del Color 1923, Nobel 1909), DIN (Deutsche Institut für Normung o German Standards Institute), Natural Sueco (Skandinaviska Färginstitutet AB, el Instituto Escandinavo del Color en 1960, que posteriormente cambió a NCS), NCS (Natural Color System, EEUU, 1985), OSA (OSA-UCS, Optical Society of America Uniform Color Space, 1947), Küppers (Harald Küppers, Alemania, Teoría del Color, 1992), etc.

La Comisión Internacional de la Iluminación en 1924, CIE por sus siglas en francés (Commission Internationale de l'Éclairage), desarrolló dos de los más utilizados sistemas para la evaluación y medición del color en términos de la reflectancia; capacidad de las superficies de reflejar la luz espectral de la muestra; el primero de ellos fue creado en 1931 con base en los valores triestímulo (X, Y, Z) y el segundo fue creado en 1976 referido a los espacios de color (L^* , a^* , b^*).

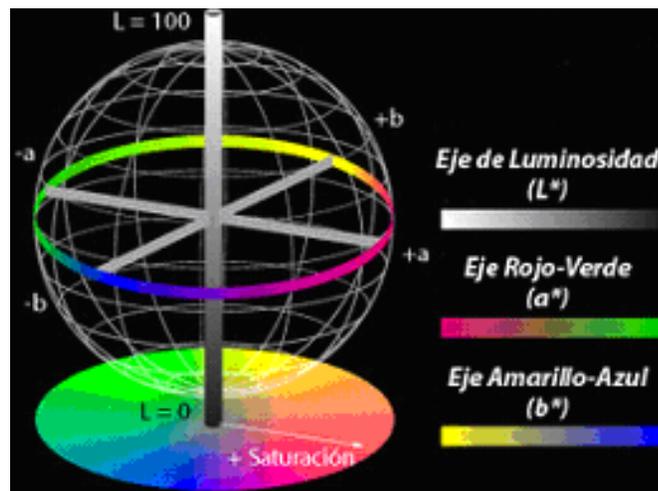


Figura 1. Diagrama de espacios de color $L^*a^*b^*$. El eje L^* o de luminosidad va de 0 (negro) a 100 (blanco), mientras que el eje a^* y b^* va de -128 a 127 . Aquellos casos en los que $a^* = b^* = 0$ son acromáticos, por ello el eje L^* representa la escala acromática de grises que va del blanco al negro, Stephen Westland ©.

El sistema CIE XYZ especifica los estímulos cromáticos basándose en valores triestímulo de tres primarios y la base de este sistema fue el observador estándar 2°. Este observador estándar de 2° es el resultado de establecer experimentalmente una igualdad entre longitudes de onda monocromáticas con mezclas de los tres primarios aditivos (rojo, verde y azul). Por otra parte, los valores triestímulo son cantidades de estos primarios que especifican un estímulo de color, se conocen como X (rojo), Y (verde) y Z (azul) y para el observador de 2° tienen un valor de $X = 55.55$, $Y = 57.33$ y $Z = 90.25$.

Por ello, ante la necesidad de un espacio de color uniforme se creó el sistema CIE $L^*a^*b^*$, también conocido como CIELAB, que es un sistema basado en la luminosidad L^* (claro u oscuro) y en los colores opuestos a^* (a^* positivo rojo, y $-a^*$ negativo verde) y b^* (b^* positivo amarillo, y $-b^*$ negativo azul), que indican la orientación del color (Figura 1).

Después de haber cuantificado el color, fue necesario cuantificar la diferencia entre una referencia y una muestra. El cálculo de estas diferencias del color es una de las aplicaciones más importantes de la colorimetría.

Bajo estos términos, la colorimetría resulta una herramienta muy útil en los tratamientos conservativos de distintas obras de arte y del patrimonio cultural y artístico, pues durante estos trabajos, no deben alterarse las características estéticas ni cromáticas del objeto, respetando el trabajo original de los autores. Para lograrlo, se debe llevar a cabo una selección correcta de los materiales a utilizar durante las distintas intervenciones, tomando en cuenta la efectividad de los tratamientos utilizados y las modificaciones cromáticas que la obra puede sufrir. Es así que, con el propósito de minimizar los cambios cromáticos en los bienes restaurados, es necesario realizar un estudio colorimétrico antes, durante y después de cada restauración, para lograr una aplicación de materiales en la restauración de una manera lo menos perceptible posible.

2. PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se llevó a cabo una caracterización de la arcilla por difracción de rayos X que permitió determinar la composición de la arcilla base y posteriormente se realizó un análisis colorimétrico a ésta y a las distintas adiciones con la finalidad de observar los efectos en sus propiedades colorimétricas, limitándonos a pruebas enfocadas para este fin, dejando de lado las propiedades mecánicas ya que no es el objetivo del presente trabajo.

2.1 Materiales empleados

Las arcillas provinieron del Banco de Arcilla de Santiago Undameo, Michoacán, México, cercano a la capital, ubicada en las coordenadas 19°42' de latitud norte y 101°11.4' de longitud oeste. Además de esta arcilla, se usaron adiciones con diferentes materiales de origen mineral y orgánico como se indicó.

Con estos resultados para el diseño del experimento, se eligieron los porcentajes de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, de acuerdo con estudios realizados por (Flores Rentería, 2010; de León Ambrosio, 2017; Flores Ponce, 2018), comparándose contra un testigo con cero adiciones.

2.2 Preparación de especímenes

La arcilla seleccionada se adicionó con los estabilizantes, según lo indicado en la norma ASTM D 6276, los materiales de adiciones se incorporaban a la mezcla en el momento de combinar los materiales (arcilla-adición) y agua para el amasado en los porcentajes indicados. Las adiciones se incorporaron en seco, manteniendo constante la temperatura ambiente entre 23-25°C, y verificando el pH de la mezcla, de alrededor de 12.4 (Flores Rentería, 2010). Los especímenes empleados en la cuantificación del color fueron pastillas estabilizadas de arcilla de 1.5 pulgadas de diámetro con ¼ pulgada espesor, como se observa en la Figura 3.

2.3 Análisis por Difracción de Rayos X

En el análisis por Difracción de rayos X, para asegurar la orientación al azar de estas partículas con respecto al haz incidente monocromático, se colocó la muestra sin compactación (Dyson, 2004; Benjamin, 1969; Kittel 2005).

En este caso se empleó un difractómetro Bruker AXS modelo D8 Advance con un detector Linx, y un tubo de rayos X de Cu con un monocromador. La figura 2 indica el difractograma de rayos X correspondiente a la arcilla estudiada. Los picos obtenidos se compararon con los patrones de reflexión de la base de datos de la JCPDF, esta comparación permitió establecer que la arcilla estudiada está compuesta mayormente por cuarzo (Q) y caolinita (K). En zonas donde las rocas graníticas y pórfidos se descomponen a gran escala, las arcillas suelen encontrarse en grandes capas de caolín, mezclado con cuarzo libre y óxidos de hierro de algunos otros minerales presentes (Dana, 1986). La DRX se realizó en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM). Las caolinitas presentan áreas superficiales de 15 a 50 m²/gr.

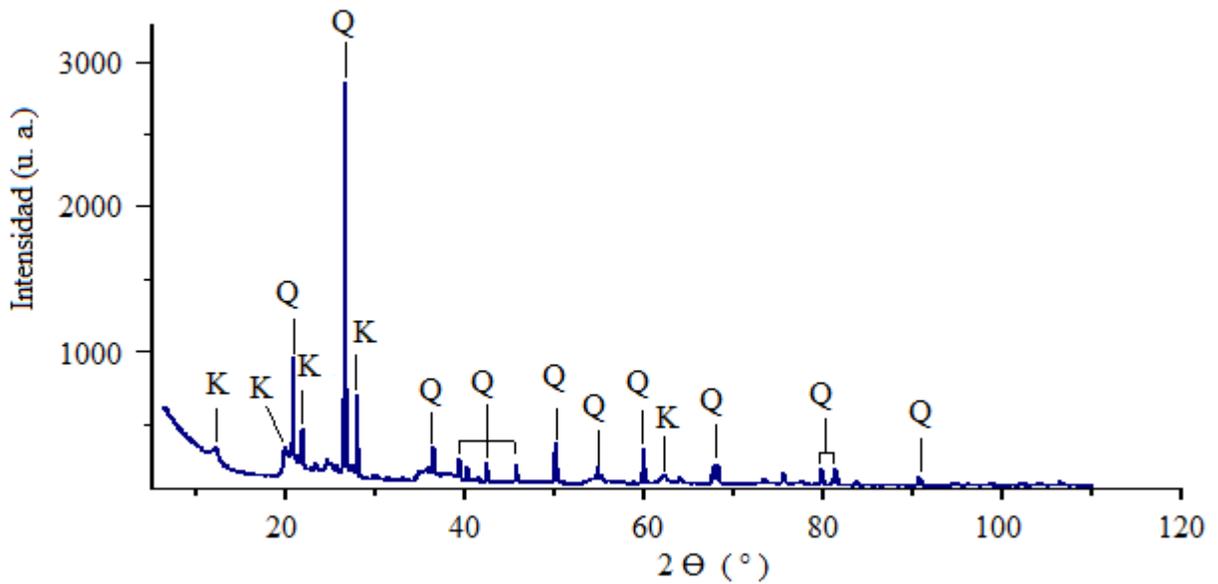


Figura 2. DRX de la arcilla, tipo de cristal identificado; Q se refiere a cuarzo y K a caolinita.

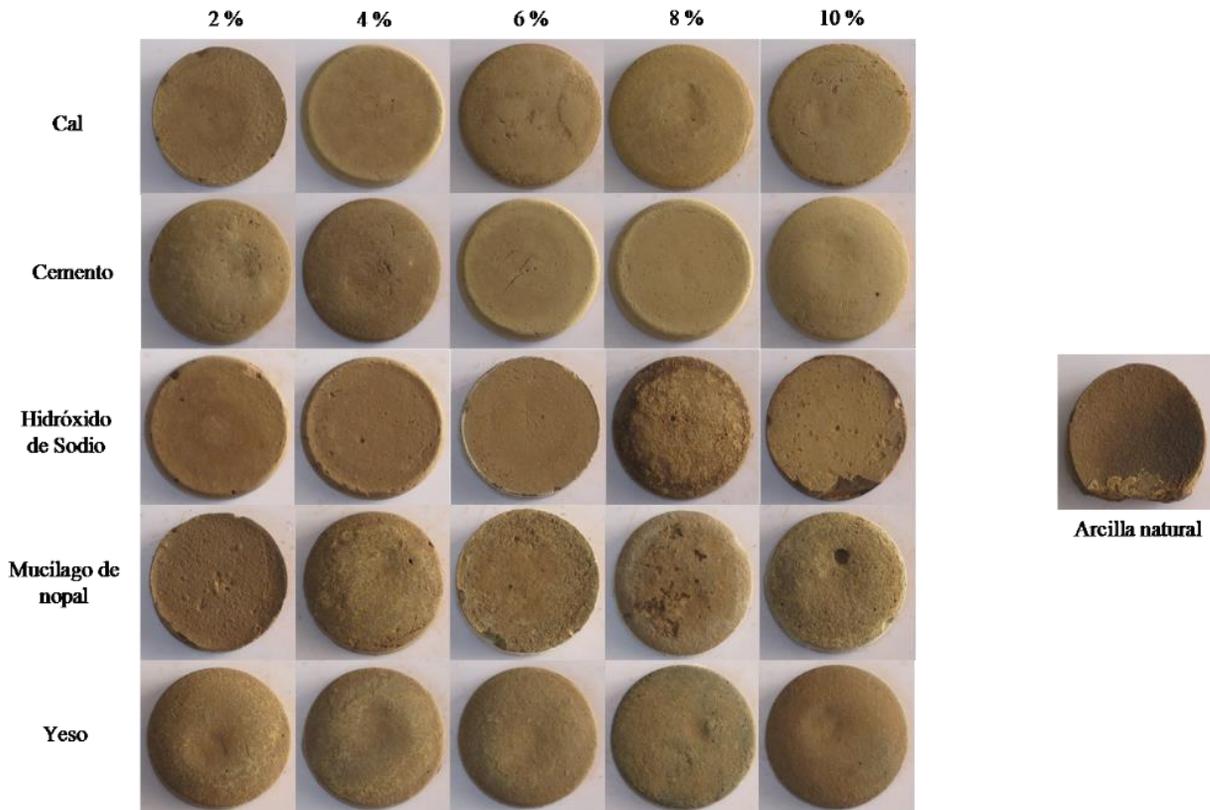


Figura 3. Pastillas o Comprimidos de arcilla adicionados con cal, cemento portland, hidróxido de sodio, mucílago de cactus opuntia blanco, y yeso, en porcentajes de 2, 4, 6, 8 y 10 %.

2.4 Análisis colorimétrico

Para estabilizar la arcilla base, se adicionaron 5 distintos materiales o productos: cal, cemento portland, yeso, mucílago de nopal e hidróxido de sodio (sosa cáustica). El objetivo de estas mediciones colorimétricas es establecer los cambios cromáticos que los distintos estabilizantes y concentraciones producen, en comparación con la arcilla natural.

Los análisis colorimétricos de la arcilla natural y de las arcillas con adiciones con concentraciones antes mencionadas, se realizaron directamente sobre los especímenes con un espectrofotómetro Ocean Optics USB2000 con fibra óptica para luz visible e infrarrojo, detector lineal CCD de silicio y sonda doble de fibras de 400 micrómetros de diámetro.

La sonda consta de seis fibras que iluminan la superficie y una sonda central efectúa la lectura de la luz dispersada. El equipo se calibró con una referencia de blanco y se restó el ruido correspondiente a la medición captada de negro con la rejilla del detector cerrada. El tiempo de integración para cada medición fue de 50 ms y se realizaron 10 integraciones para disminuir el ruido de los espectros de luz dispersada.

Los especímenes se analizaron por el anverso y el reverso, se realizaron tres medidas en cada uno de los lados en zonas claras, oscuras y medias con la finalidad de promediar las medidas del color obtenidas. Los datos referentes a la luminancia, coordenadas a^* y b^* , croma (C) y matiz (h), se analizaron con el software del equipo Ocean Optics SpectralSuite®.

3. RESULTADOS

Utilizando este arreglo, se establecieron las medidas colorimétricas de la arcilla natural de acuerdo a la Tabla 1. Graficando estos datos en el espacio CIE $L^*a^*b^*$ figura 4, y realizando una yuxtaposición con la región del círculo cromático correspondiente a estas coordenadas, fue posible establecer que la arcilla presenta tonalidades rojas y amarillas – como era de esperarse pues este compuesto adquiere dicho color al ser horneado.

La luminosidad de la arcilla se encuentra casi en el centro del sistema CIE $L^*a^*b^*$, por lo que puede considerarse que es un material ligeramente opaco. Esta característica puede deberse a que la superficie de dicho compuesto es rugosa, lo que evita una reflexión especular de luz que recibe. Debido a ello, si se desea igualar colorimétricamente este compuesto, no sólo es necesario buscar unas medidas colorimétricas similares, sino también una textura similar. Además, para fines de experimentación y normativa, las arcillas pasaron malla 200 ASTM y se retuvieron en malla 400 ASTM, implica un diámetro de 63.5 a 127micras

Tabla 1. Coordenadas CIE $L^*a^*b^*$ de la arcilla natural utilizada, en dicha tabla se muestra el promedio de luminosidad (L^*), cantidad de rojo – verde (a^*) y azul – amarillo (b^*) que tiene la muestra, así como también el matiz (h) y la croma (C) de ésta.

ARCILLA NATURAL (TESTIGO SIN ADICIONES)				
L^*	a^*	b^*	H	C
43.2± 6.2	11.1± 2.8	11.8± 4.0	46.0± 2.4	16.2± 4.8
37.00 a 49.40	8.30 a 13.90	7.80 a 15.80	43.60 a 48.40	11.40 a 21.00

Los datos anteriores de tabla 1 y figura 4 sirven como comparativo para las medidas colorimétricas de las distintas adiciones. En el caso de las adiciones de cal a la arcilla, figura 5, se encontró que, si bien las concentraciones de 2, 4 y 8 % son colorimétricamente comparables con la arcilla natural, las concentraciones del 6 y 10 % no lo fueron, pues sus distancias a las coordenadas a^* y b^* de la arcilla tienen valores mayores a los de la desviación estándar reportada para dichos datos.

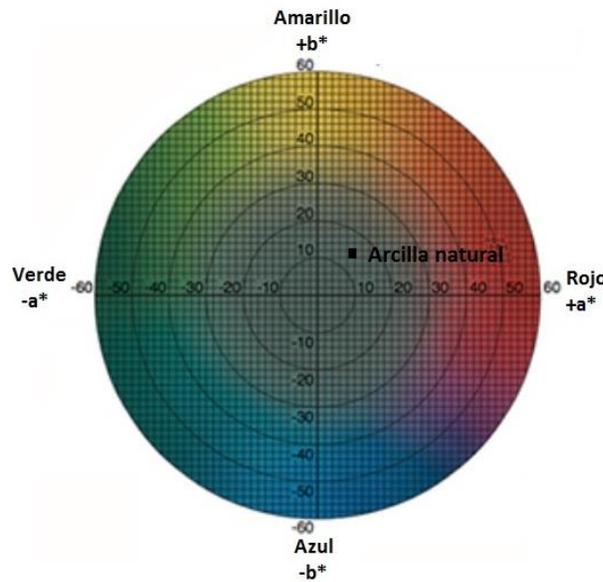


Figura 4. Se muestran, en promedio, las coordenadas a^* y b^* de la muestra de arcilla natural, así mismo se indica el tono de esta con el círculo cromático.

Esto es posible analizarlo también con la figura 5, que indica la posición de las adiciones en comparación con la arcilla. En dicha figura 5, es visible que los puntos correspondientes a las adiciones de 6 y 10 %, son los más alejados de la posición colorimétrica de la arcilla. Se considera que se requiere una diferencia de dos unidades en este sistema de coordenadas colorimétricas para que una diferencia en color sea visible con el ojo humano.

La cantidad de luminosidad de la arcilla con adición de cal es comparable con la cantidad lumínica de la arcilla natural pues los valores medidos, con su respectiva desviación estándar, se encuentran dentro de la incertidumbre en comparación del valor de la arcilla.

Las medidas colorimétricas de las arcillas con diferentes concentraciones de cemento están indicadas en la Figura 6. Análogamente al razonamiento para la cal, se compararon las coordenadas a^* y b^* de dicha adición con la arcilla natural; con base en ello se encontró que, a excepción de la coordenada b^* de la adición de 8 %, todas las distancias colorimétricas son menores a las desviaciones de las coordenadas a^* y b^* correspondientes a cada adición. Esto permite afirmar que las medidas colorimétricas de la arcilla natural y las adiciones de cemento en cualquier porcentaje son muy similares.

Esto se hace patente en la figura 6 donde es evidente que, si bien hay puntos muy alejados de la arcilla, como es el caso de la adición del 2 %, este valor se encuentra dentro de la incertidumbre. El cemento también presenta valores lumínicos comparables con los de la arcilla natural, en general, es más luminoso; sin embargo, las desviaciones de estos valores incluyen el valor de la arcilla natural.

En las arcillas con las adiciones de hidróxido de sodio (sosa cáustica) ocurre una situación similar a la del cemento: todas las distancias colorimétricas se encuentran dentro del intervalo de la desviación estándar, a excepción de la coordenada b^* de la adición de 8 %. Esto puede verificarse en la figura 7, donde el punto correspondiente a la arcilla sólo queda fuera de la incertidumbre marcada para la coordenada b^* de la adición de 8 %.

A excepción de la adición del 8 %, el hidróxido de sodio es más luminoso que la arcilla natural, pero la desviación estándar de todas las concentraciones indica que dichos valores son comparables con la luminosidad de la arcilla natural.

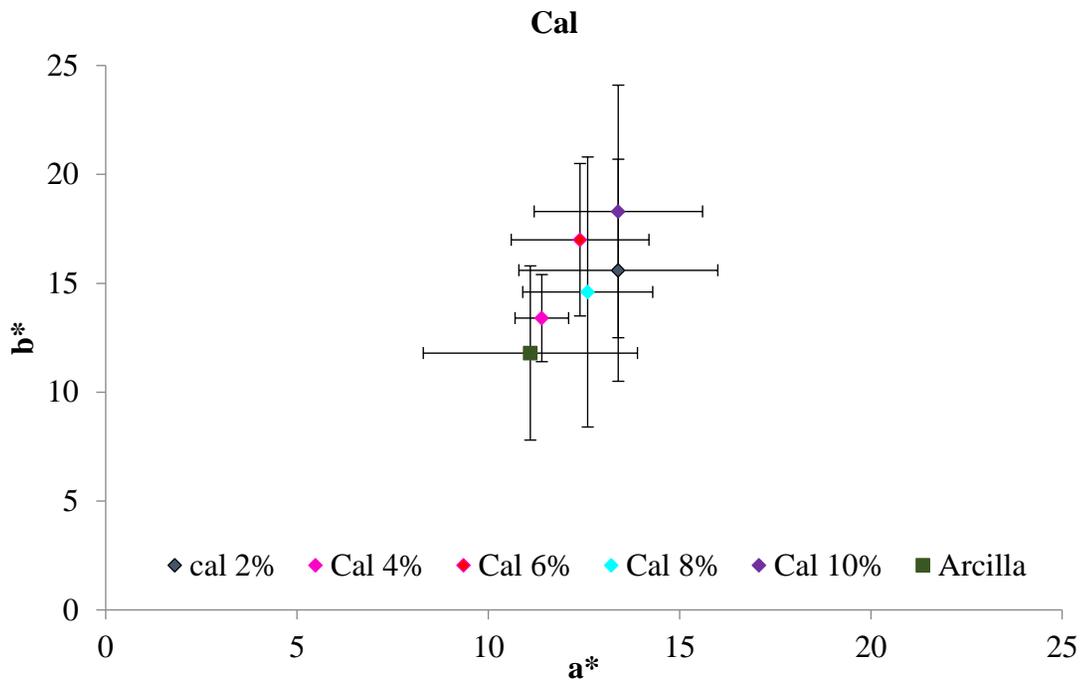


Figura 5. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a* y b* de las distintas adiciones en porcentajes, de la cal, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

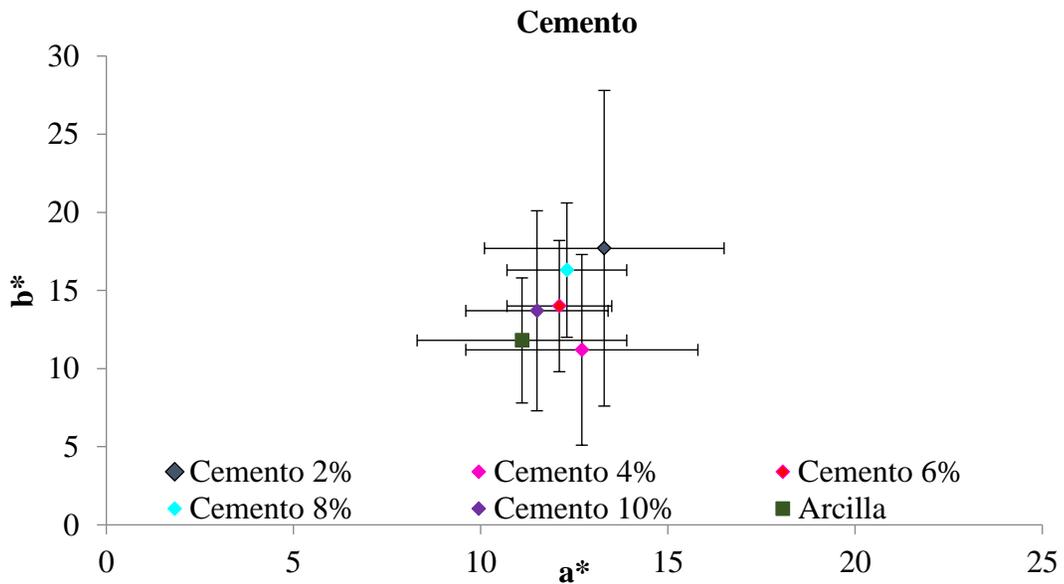


Figura 6. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a* y b* de las distintas adiciones del cemento portland, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

Hidróxido de Sodio (Sosa Cáustica)

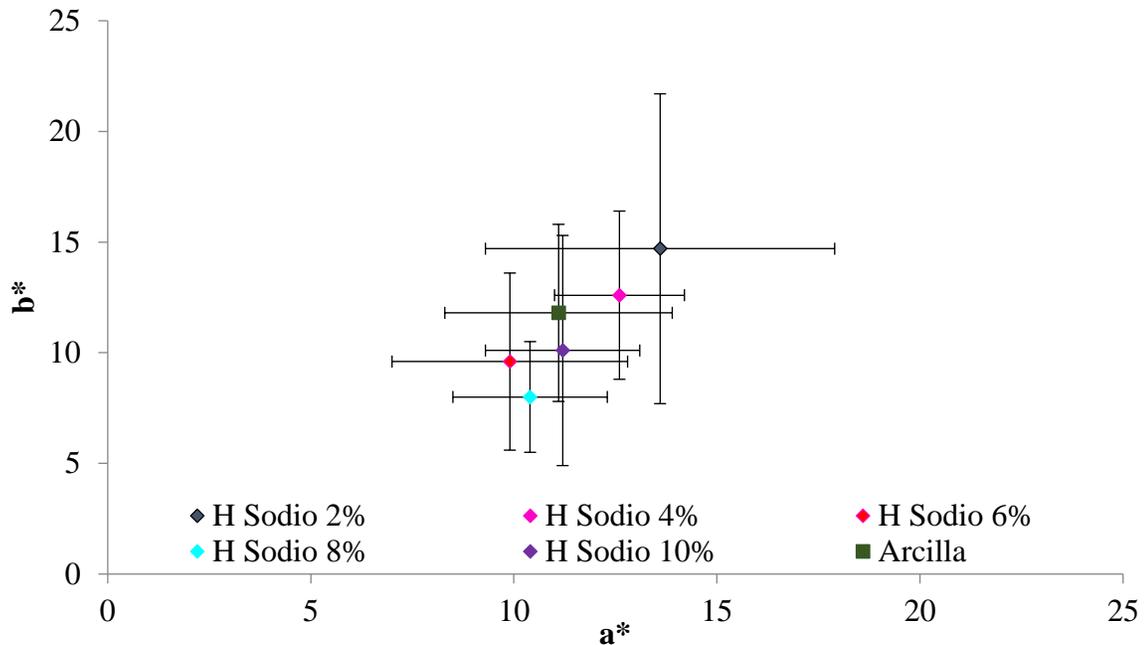


Figura 7. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a* y b* de las distintas adiciones del hidróxido de sodio, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

En lo que se refiere a las arcillas con adición de mucílago de nopal, la distancia colorimétrica entre la arcilla y la adición de 6 % se encuentra fuera de la desviación estándar, esto se verifica con la figura 8, por lo que también en este caso se puede decir que existe una similitud satisfactoria entre los tonos de las distintas adiciones de mucílago de nopal y la arcilla.

Mucílago de Nopal

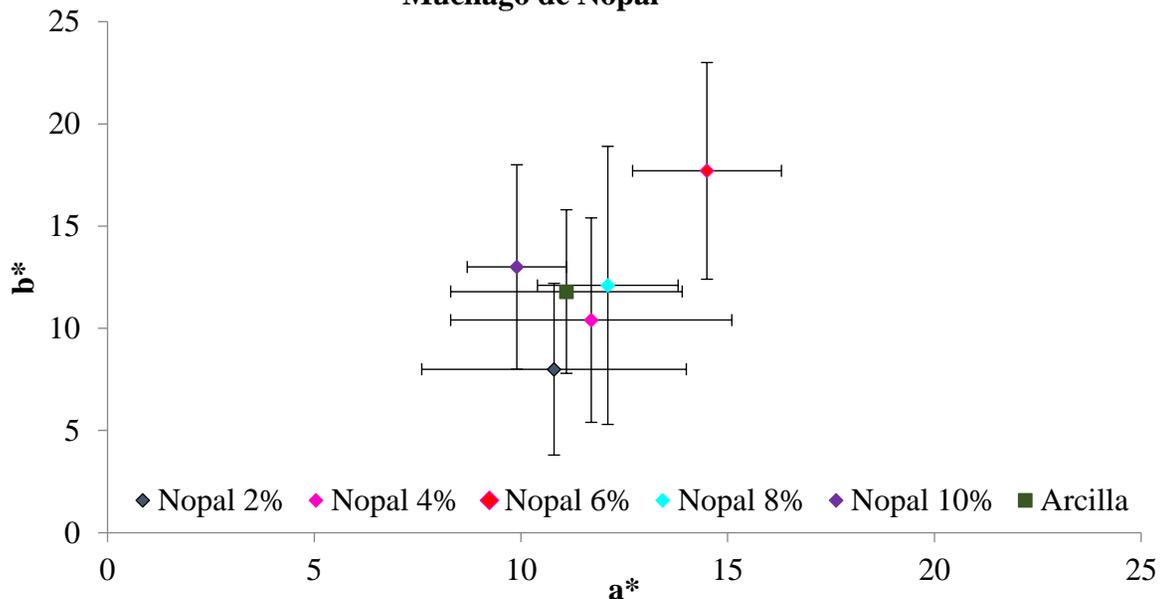


Figura 8. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a* y b* de las distintas adiciones de mucílago de cactus opuntia blanco, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

La cantidad luminosa del mucílago de nopal es comparable con la de la arcilla; a excepción de la adición del 6 %, que resulta la adición más luminosa de todas las muestras y cuyo valor, incluso con la desviación estándar, resulta superior que el valor medido para la arcilla.

Para las arcillas con adiciones de yeso, sólo la adición del 8 % se encuentra dentro de los rangos de la desviación estándar. En general, las adiciones restantes, ya sea en una (2 y 10 %) o ambas coordenadas (4 y 6 %) se encuentran fuera de este rango. Esto puede verse claramente en la figura 9, en ella, los puntos, en comparación con las figuras anteriores, se encuentran más distantes del punto de la arcilla, por lo que este elemento es el menos parecido colorimétricamente a la arcilla. Las adiciones de yeso son mucho más opacas que la arcilla natural, las de 6, 8 y 10 % tienen cantidades comparables con la medida de la arcilla natural, las concentraciones del 2 y 4 % son más opacas, a pesar de las desviaciones.

Por otra parte, las diferencias colorimétricas entre las distintas concentraciones para cada una de las adiciones se observan en la figura 10. En ella se comparan las coordenadas a^* (líneas rojas), b^* (líneas amarillas) y L^* (líneas grises) de cada porcentaje en comparación con dichas coordenadas de la arcilla natural (líneas punteadas).

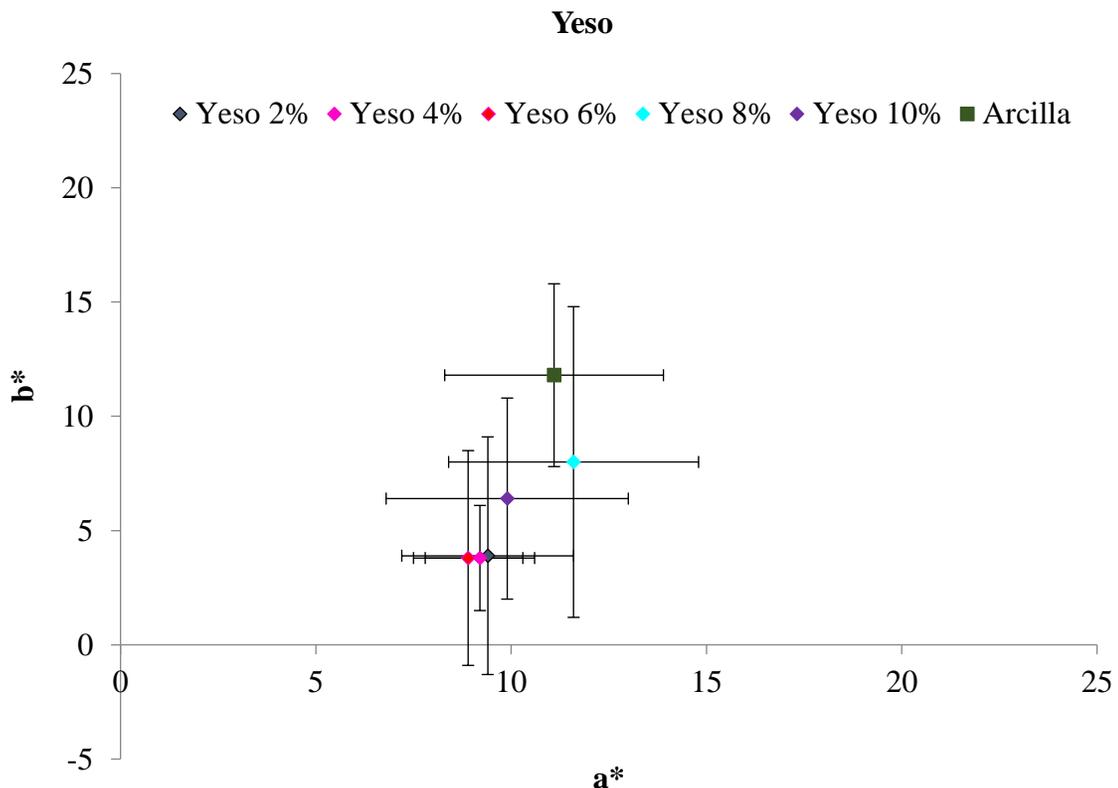


Figura 9. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a^* y b^* de las distintas adiciones de yeso, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

En la figura 10, se observa que la cantidad de rojo, en las distintas adiciones, toma valores cercanos a los de la arcilla natural; no así en el caso de la luminosidad ni de la cantidad de amarillo de las arcillas modificadas, por lo que son estas coordenadas las que determinarán definitivamente la similitud de una adición con la arcilla natural.

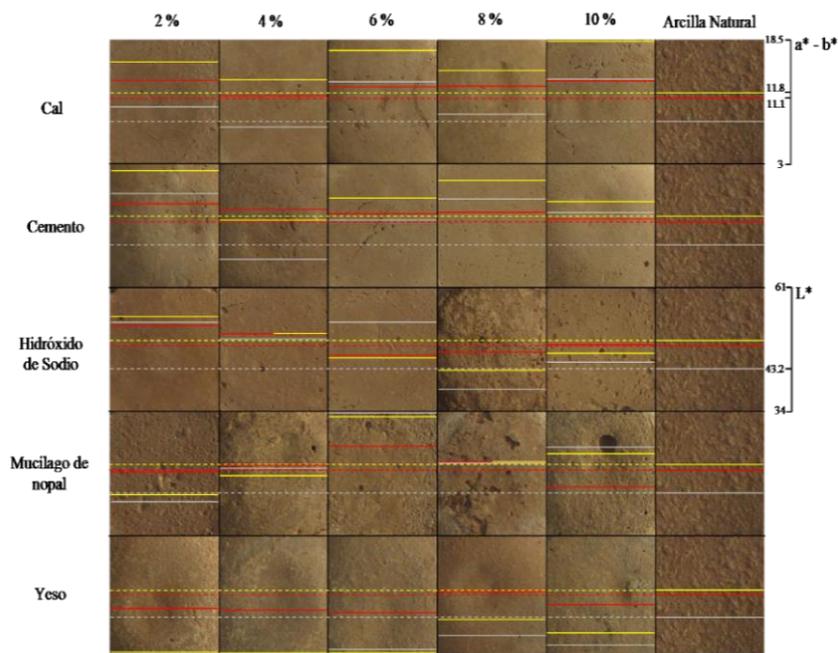


Figura 10. Comparativo entre las distintas concentraciones de las adiciones de los cinco elementos y la arcilla natural.

Visto en este diagrama, se hacen más evidentes las diferencias entre las arcillas con las diferentes adiciones y la arcilla natural. Ninguna de las arcillas con adiciones es cercana a la arcilla base en todas sus coordenadas, pues, en su mayoría, las muestras estudiadas son mucho más luminosas. Este hecho puede deberse que la superficie de los comprimidos es, en mayor o menor medida, más lisa que la superficie de arcilla natural estudiada, por lo que, como antes ya se había mencionado, no sólo es importante considerar las medidas colorimétricas de las adiciones, sino también su textura.

4. CONCLUSIONES

Con base en los análisis de colorimetría realizados con arcillas sin y con adiciones, se establece que las adiciones de cemento portland, hidróxido de sodio y mucílago de nopal son las más parecidas colorimétricamente a la arcilla natural, en lo general. Las medidas colorimétricas de la cal presentan menos similitudes, pero aún pueden dar un color más cercano que el yeso, cuya única similitud en color con el testigo es la adición de 8 % en ambos casos (cal y yeso), pero no cumple totalmente con el matiz. Por tanto, para realizar tratamientos consolidantes de artículos manufacturados con arcilla cruda, es recomendable utilizar, ya sea cemento portland con 6% de adición en peso; hidróxido de sodio con un máximo de 4% de adición o mucílago de nopal con dos porcentajes: 4 % y 8 % de adición, de esta forma, el objeto restaurado conservará, en gran medida, sus propiedades colorimétricas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de las Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, así como del CONACYT y de la SEP a través de los proyectos de programas de Redes Temáticas Prodep, Profocie, PFCE. También agradecen el apoyo técnico del Ing. Amado Flores Rentería en la elaboración de las pastillas.

6. REFERENCIAS

- Ahmed, A., Keizo, U. (2011), Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. *Cold Regions Science and Technology*. 66(2 & 3): 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.12.004>
- Ahmed, A., Usama, H. I. (2014), Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment. *Soils and Foundations*. 54(3):405-416. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.009>
- Anikwe, M. A. N., Eze, J. C., Ibudialo, A. N. (2016), Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 158: 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Flores Ponce, A. (2018), “*Morteros base arcilla, estabilizados con adiciones orgánicas y minerales para su uso patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-31.
- Benjamin, W. A. (1969), “*Introduction to Crystallography*”. New York, USA, Inc., pp. 83–100.
- Besoain, E. (1985), “*Mineralogía de arcillas de suelos*”. San José, Costa Rica. IICA, pp. 997–1013.
- Carrol, D., Starkey, H. C. (1971), *Reactivity of clay minerals with acids and alkalies*. *Clays and Clay Minerals*. 19: 321-333.
- Cuellar López, A. M. A. (2014), “*Tecnología de Morteros Constructivos de Tierra: una tradición en la vertiente del Lerma Medio en el Epiclásico*”, tesis Maestría Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp. 50-125.
- Ma, C., Qin, Z., Zhuang, Y., Chen, L., Chen, B. (2015), *Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay*. *Soils and Foundations*. 55(5):1222–1232. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.021>
- Dana, E. S., Ford, W. E. (1986), “*Tratado de Mineralogía*”, Editorial Cecsca, Decimotercera Impresión, México, pp. 741-745.
- De León Ambrosio, B. (2017), “*Estabilización De Arcilla Para Uso En Estructuras Patrimoniales: Evaluación De Sus Propiedades Físico-Mecánicas A Edades Tardías*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 50-65.
- Dyson, D. J. (2004), “*X – Ray and Electron Diffraction Studies in Materials Science*”. Londres, Inglaterra. Editorial Maney Publishing, pp. 77–97, 115–134.
- De Aquino, R. E., Marques, J., Costa Campos, M. C., de Oliveira, I. A., de Souza Bahia, A. S. R., Coutrim dos Santo, L. A. (2016), *Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas*, Review Article. *Geoderma*. 262:35-44. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 15-35.
- Gómez González, M. L. (2008), “*La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*”. 5ª Edición. Madrid, España. Cátedra, pp. 31–37.
- Gupta, D., Kumar, A. (2017), *Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ashclay mixture as a highway construction material*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 9:159-169. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M. (2015), *Effect of freeze–thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays*. *Cold Regions Science and Technology*. 119:151-157. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>

- Hradil, D., Bezdička, P., Hradilová, J., Vašutová, V. (2016), *Microanalysis of clay-based pigments in paintings by XRD techniques*. *Microchemical Journal*. 125:10-20. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.10.032>
- Johnston Feller, R. (2001), “*Color Science in the Examination of Museum Objects. Non-destructive Procedures*”. California, USA. The Getty Conservation Institute, pp. 15–56.
- Khemissa, M., Mahamedi, A. (2014), *Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay*. *Applied Clay Science*. 95:104-110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>
- Kittel, C. (2005), “*Introduction to Solid State Physics*”. 8ª edición. New York, USA. John Wiley & Sons, Inc., pp. 35–39.
- Kuttah, D., Sato, K. (2015), *Review on the effect of gypsum content on soil behavior, Review Article*. *Transportation Geotechnics*. 4:28-37. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.003>
- Lamb, T., Bourriau, J. (1995), « *Colour. Art & Science*” (Darwin College Lectures), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Li, Y., Zhang, H., Tu, C., Song, F., Luo, Y. (2015), *Occurrence of red clay horizon in soil profiles of the Yellow River Delta: Implications for accumulation of heavy metals*. *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.006>
- Lin, Y. -H., Hori, Y., Hoshino, S., Miyazawa, C., Kohno, Y., Shibata, M. (2014), *Fluorescent colored material made of clay mineral and phycoerythrin pigment derived from seaweed*. *Dyes and Pigments*. 100:97-103. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.08.022>
- López-Lara, T., Zepeda-Garrido, J. A., Castaño, V. M. (1999), *Comparative Study of the effectiveness of different additives on the expansion behavior of clays*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 4.
- Mahmoudi S., Bennour, A., Meguebli, A., Srasra, E., Zargouni, F. (2016), *Characterization and traditional ceramic application of clays from the Douiret region in South Tunisia*. *Applied Clay Science*. 127 & 128: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.010>
- Mardani-Aghabaglou A., Kalipcilar, İ., İnan Sezer, G., Sezer, A., Altun, S. (2015), *Freeze–thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack*. *Applied Clay Science*. 115:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.041>
- Mattone, R. (2005), *Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique*. *Cement and Concrete Composites*. 27 (5) pp :611-616. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.016>
- Modarres A., Nosoudy, Y. M. (2015), *Clay stabilization using coal waste and lime — Technical and environmental impacts*. *Applied Clay Science*. 116 & 117 pp:281-288. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.026>
- Olguin Domínguez, M. A. (2008), “*Efectos mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO4*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 10-50.
- Özkan, I., Yayla, Z. (2016), *Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples*. *Ultrasonics*. 66:4-10. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.12.008>
- Hu, Q., Xu, Z., Qiao, S., Haghseresht, F., Wilson, M., Lu, G. Q. (2007), *A novel color removal adsorbent from heterocoagulation of cationic and anionic clays*. *Journal of Colloid and Interface Science*. 308 (1):191-199. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.12.052>
- Rathossi, C., Pontikes, Y. (2010), *Effect of firing temperature and atmosphere on ceramics made of NW Peloponnese clay sediments. Part I: Reaction paths, crystalline phases, microstructure and colour*. *Journal of the European Ceramic Society*. 30(9):1841-1851. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.02.002>

- Sangiorgi C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G. (2016), *Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts*. Construction and Building Materials. 109:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.052>
- Valanciene V., Siauciunas, R., Baltusnikaite, J. (2010), *The influence of mineralogical composition on the colour of clay body*. Journal of the European Ceramic Society. 30(7):1609-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.017>
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., Keramatikerman, M. (2016), *Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag*. Applied Clay Science. 124 & 125:243-251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Velázquez Pérez, J. A. (2015), “*Arqueología experimental en Morteros Base Cal para Uso Patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-60.
- Viscarra Rossel, R. A., Cattle, S. R., Ortega, A., Fouad, Y. (2009), *In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy*. Geoderma. 150(3 & 4):253-266. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>
- Westland, S. © (2017), <http://www.design.leeds.ac.uk/people/stephen-westland/>.
- Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y., Zha, F. (2016), *Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin*. Applied Clay Science. 127 & 128:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.040>
- Caoa, Y., Guoa, Q., Zhuanga, Y., Yua, Z., Guoa, W., Zhangb, C., Zhub, M., Zhaoa, Q., Ren T., (2017), *Removal of harmful constituents from geothermal water by selected anion clays*. Procedia Earth and Planetary Science. 17:161 – 164. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.041>
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W., (2016), *The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials*, Construction and Building Materials. 106:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031>
- Zhang, X., Mavroulidou, M., Gunn, M. J. (2015), *Mechanical properties and behaviour of a partially saturated lime-treated, high plasticity clay*. Engineering Geology. 193:320-336. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.007>

Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado

R. A. Berenguer^{1*} , J. C. Mariz³ , Â. Just^{2,3} , E. C. B. Monteiro^{2,3} , P. Helene⁴ , R. A. Oliveira^{1,2} , A. M. P. Carneiro¹ 

*Autor de Contacto: templarios_pm@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

Recepción: 11/08/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

En el presente estudio busca discutir o efectuar dos incorporadores de comportamiento no mecánico y durabilidad de elementos de hormigón moldeado no locales. El experimento fue desarrollado con un conjunto de muestras con 4 masas específicas diferentes (1500 kg / m³, 1700kg / m³, 2000kg / m³ y 2300kg / m³) y 3 relaciones agua / alimento (0,63 - 1: 5, 0,50 - 1: 4, 0,43 - 1: 3), pruebas para determinar la resistencia a la compresión, absorción de agua, velocidad de profundidad y profundidad de la carbonatación. Los resultados obtenidos no son expresivos, no se comportan como indicadores de protección de armadura (absorción de agua y carbonatación), o que confirme la necesidad de usar suavizantes de agua adicionales para la estructura (tintas de protección, barras de acero inoxidable) debido a la pérdida prematura. Da durabilidad a lo largo de su vida útil.

Palabras clave: concreto ligero y aire incorporado; pared de concreto; resistencia a la compresión; capilaridad; absorción.

Citar como: R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro (2018), "Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 178 - 193, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

¹ Departamento de Engenharia Civil-Estruturas e Materiales, Universidad Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Universidad Católica de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidad de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

⁴ Ph.D.-Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Rua Visconde em Ouro Negro, Sao Paulo, Brasil

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Comparative assessment of the mechanical behaviour of aerated lightweight concrete

ABSTRACT

The present study aims to discuss the effect of air entrainment on the mechanical behavior and durability of molded concrete elements. The experiment was carried out using samples with 4 different masses (1500 kg/m³, 1700 kg/m³, 2000 kg/m³, and 2300 kg/m³) and 3 water/cement ratios (0.63-1:5, 0.50-1:4, 0.43-1:3) that were tested to determine compressive strength, water absorption, void index, and carbonation depth. The results showed significant decreases in performance and in the protection indicators of the armature (water absorption and carbonation), confirming the need for additional mitigation for the structure (protective paints, stainless steel bars), under penalty of premature loss of durability over its lifetime.

Keywords: lightweight concrete and incorporated air; concrete wall; compressive strength; capillarity; absorption.

Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado

RESUMO

O presente estudo visa discutir o efeito dos incorporadores de ar no comportamento mecânico e de durabilidade de elementos de concreto moldados no local. O experimento foi desenvolvido com a confecção de amostras com 4 diferentes massas específicas (1500kg/m³, 1700kg/m³, 2000kg/m³ e 2300kg/m³) e 3 relações água/cimento (0,63 – 1:5, 0,50 – 1:4, 0,43 – 1:3), ensaiados para determinação da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e profundidade de carbonatação. Os resultados obtidos apontaram quedas expressivas no comportamento e indicadores de proteção da armadura (absorção de água e carbonatação), o que confirma a necessidade de utilização de meios adicionais mitigadores para a estrutura (pinturas protetoras, barras inoxidáveis), sob pena da perda prematura da durabilidade ao longo da sua vida útil.

Palavras-chave: concreto leve e ar incorporado; parede de concreto; resistência à compressão; capilaridade; absorção.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto de cemento Portland es el material estructural más importante de la construcción civil en la actualidad. Conforme lo descrito por (Helene y Andrade, 2007), aun siendo lo más reciente de los materiales de construcción de estructuras el concreto puede ser considerado como uno de los descubrimientos más interesantes de la historia del desarrollo de la humanidad y su calidad de vida. El uso de la técnica de paredes de concreto vaciadas en sitio se ha tornado una opción bastante usada en Brasil con vistas a suplir el déficit habitacional, muy notorio de carácter social. Ocurre que en locales de clima caliente es necesaria la discusión de la incomodidad térmica proporcionada a partir del uso de ese tipo de material, lo que puede ser minimizado con el concreto de menor peso específico, obtenido con la incorporación de aditivos incorporadores de aire. Esa técnica, puede llevar a una caída tanto en el comportamiento mecánico como en la protección de la entrada de agua y agentes agresivos al interior de la estructura.

Se de estaca que esos sistemas son utilizados en obras, en el país hay cerca de 30 años y según (Corsini, 2011), se divide básicamente en dos tipos que va a depender del concreto adoptado: pared de concreto con densidad normal y paredes de concreto liviano. Para la regulación del sistema de paredes de concreto convencional fue publicada en 2012 la (ABNT NBR 16055, 2012).

Para sistemas de paredes con concreto liviano espumoso existen normas que datan de 1992 (ABNT NBR 12645 y NBR 12646, 1992), las cuales están en revisión actualmente, con discusiones importantes en lo que se refiere a la mejoría del desempeño térmico asociado a la natural pérdida de protección de la armadura dada por el propio concreto. En ese sentido, la presente pesquisa evaluó por medio de un desarrollo experimental, concretos con diferentes niveles de peso específico y sus consecuencias en las principales propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) y de calidad de la pasta (absorción de agua, índice de vacíos, profundidad de carbonatación etc.) para contención de la entrada de agua al interior de la estructura.

1.1 Concretos aligerados

Conforme lo presentado por (Rossignolo, 2009), los concretos aligerados se caracterizan por la reducción del peso específico en relación con los concretos convencionales consecuencias de la sustitución de parte de los materiales sólidos por aire. Para (Romano, R. C. O. et. al., 2015), pueden ser clasificados en concreto con agregados aligerados, concreto celular y concreto sin finos. Según la (NBR 8953, 2015, los concretos son clasificados por el peso específico de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación en cuanto al peso específico. Fuente: (NBR 8953, 2015).

Nomenclatura	Peso específico seca (kg/m ³)
Concreto liviano (CL)	< 2000
Concreto normal (C)	2000 a 2800
Concreto pesado o denso (CD)	> 2800

El análisis de los pesos específicos obtenidas para grupos de concreto permite una correlación con la inclusión de vacíos en los mismos. La relación entre el contenido de aire aprisionado intencionalmente y el peso específico es bastante directa; un aumento en el volumen de aire promueve una reducción en los valores de peso específico, manteniéndose la misma relación de materiales. De esta forma, con la disminución de los pesos específicos de los concretos es obtenida a través de la inclusión de estos vacíos es su interior.

El grupo de concretos aligerados, es así de amplio y no corresponde simplemente clasificarlos por sus pesos específicos solamente. Otras características también son tomadas en consideración. La forma como son producidos, esto es que materiales y procesos son considerados en su elaboración la resistencia mecánica, la trabajabilidad, la retracción y fluencia, entre otras.

1.2 Aditivo incorporador de aire

De acuerdo con (Du, L. et. al., 2005; Whiting, D. A. et. al., 1999), los aditivos incorporadores de aire presentan la función de producir burbujas de aire, estables, distribuidas uniformemente dentro del concreto. Según (Mehta y Monteiro, 2014), los aditivos incorporadores de aire son productos tensoactivos, generalmente constituidos de sales de resinas de madera, materiales proteicos y ácidos grasos y algunos detergentes sintéticos. Para (Kumaran, K. et. al., 2004), el aire incorporado por fuerza del aditivo tiene forma de pequeñas burbujas de dimensiones entre 0,01 mm y 1,00 mm, se distancian entre sí de 0,10 mm a 0,20 mm y poseen comportamiento elástico.

Según (Torres, D. R. et. al., 2014), el aditivo incorporado a la mezcla promueve la reducción de la tensión superficial del agua. Para (Fujii, A. L. et. al., 2015 e Bauer, 1994), este actúa envolviendo las burbujas de aire presentes y actúa también envolviendo las partículas de agregado fino y de cemento. El conjunto formado entre las partículas sólidas involucradas y las burbujas de aire, también involucradas, presenta mayor estabilidad que los grupos aisladamente. A pesar de reducir la resistencia mecánica del concreto, la incorporación de aire mejora la trabajabilidad de este,

mejora el comportamiento del material durante el transporte, que es hecho con menor posibilidad de segregación y disminuye la exudación.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La definición de las proporciones utilizadas fue efectuada a partir de una adaptación del método de dosificación del Ibracon (Helene y Terzian, 1992), con el uso de muestras de concreto con 3 proporciones cemento: agregado, 1:3, 1:4 y 1:5, todas con la misma consistencia (170 ± 30) mm, lo que obligó al uso de 3 diferentes relaciones agua/cemento, respectivamente, 0,43, 0,50 y 0,63 (Tabla 2). También se ha fijado el contenido de mortero ($\alpha\%$) de 0,65 para todas las dosis, comúnmente adoptado para la elaboración de concretos aligerados.

Para cada una de esas dosificaciones fueron confeccionadas muestras con 4 niveles de peso específico en estado fresco, obtenidas con el uso de aditivos polifuncionales (Mira 93 / Grace – densidad: $1,17\text{g/cm}^3$) e incorporador de aire (SikaAer – densidad: $1,01\text{g/cm}^3$, naturaleza: líquida, base: resina sintética, pH (23°C) 10-12, concentración de sólidos(%): 4-6, con valores fijados, respectivamente, en 0,5% e 0,1% en relación al peso de cemento, lo que totalizó 12 familias de estudio. El incremento de la cantidad de vacíos fue obtenido a partir del aumento del tiempo de mezcla del concreto en la hormigonera (entre 3 y 15 minutos), una vez que la cantidad de aditivo incorporador fue mantenido constante.

Tabla 2. Presentación de los grupos y subgrupos del estudio.

Grupo(1:m)	Subgrupo	Peso específico aproximado(kg/m^3)
A (1:5) a/c=0,63	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
B (1:4) a/c=0,50	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
C (1:3) a/c=0,43	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500

Para la realización del estudio fueron vaciados 120 probetas cilíndricas (10x20) cm de concreto, distribuidos para la realización de los ensayos de determinación del peso específico (estado fresco y endurecido), resistencia a la compresión (7 y 28 días), absorción total y capilar y profundidad de carbonatación, conforme lo descrito en la Tabla 3. Todos los ensayos fueron realizados de acuerdo con sus respectivas normas vigentes las cuales están descritas en la Tabla 4.

Tabla 3. Descripción de la muestra utilizada en el experimento.

Grupo	m	Subgrupo	Peso específico	Ruptura (7 e 28) días	Absorción y Pesp Seca	Capilaridad	Carbonatación	Total de CPs
A	1:5	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10

		4	1400	4	2	3	1	10
B	1:4	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10
		4	1400	4	2	3	1	10
C	1:3	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10
		4	1400	4	2	3	1	10
Total CPs		-		48	24	36	12	120

Tabla 4. Ensayos y Parámetros normativos.

ENSAYOS:	Parámetros Normativos	Equivalencias Internacionales
Determinación de peso específico	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C231/C231M:2017 ASTM C29/C29M:2017
Resistencias a compresión	ABNT NBR 5739:2007	ASTM C39/C39M:2018
Consumo de Cemento	ABNT NBR 12655:2015	ASTM C1084:2010
Absorción de agua, índice de vacíos y peso específico	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C29/C29M:2017
Absorción capilar	ABNT NBR 9779:2012	ASTM C1585:2013
Profundidad de Carbonatación	RILEM CPC-18, 1988	-----

2.1 Producción del concreto en laboratorio

Para la producción de los concretos en laboratorio, fueron utilizados agregados secos, y mezcla previa de los agregados gruesos y finos, cemento tipo CP-V ARI similar al tipo III de la (ASTM C150, 2017). Algunas de las principales características de los agregados usados están descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de las características físicas de los agregados usados en la investigación.

Características de los agregados	Agregado fino	Agregado grueso
Módulo de finura	1,71	5,51
Diámetro máximo (mm)	2,36	12,5
Peso específico seco (g/cm ³)	2,63	2,77
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,73	2,72
Peso específico suelta (kg/m ³)	1.620	1.470

Luego y posterior a la mezcla inicial de los materiales, fue adicionado el aditivo polifuncional junto a la parte del agua de amasado (reservando aproximadamente 500ml de agua de la mezcla para la adición del incorporador de aire). Posterior a la mezcla inicial del concreto, fueron determinados sus asentamientos y sus respectivos Pesos específico. Seguidamente el aditivo incorporador fue adicionado junto con el restante de agua, de acuerdo con la Figura 1.

Posterior al trabajo de producción, el peso específico fresco de los concretos fue medida hasta se llegar al valor aproximado de aquellas pretendidas y estipuladas inicialmente.



Figura 1. Mezcla de los materiales en hormigonera. Sin aditivo incorporador (a) y con aditivo incorporador (b).

3. RESULTADOS

En edades previstas posterior al vaciado y curado húmedo, las muestras fueron encaminadas para ensayos diversos previstos para el estado endurecido. La Figura 2 presenta gráfico con los pesos específicos de acuerdo con la (ABNT NBR 9778, 2009), y sus respectivas equivalencias (ASTM C231/C231M y ASTM C29/C29M, 2017), obtenidas en los concretos frescos para los diferentes grupos de estudio evaluados.

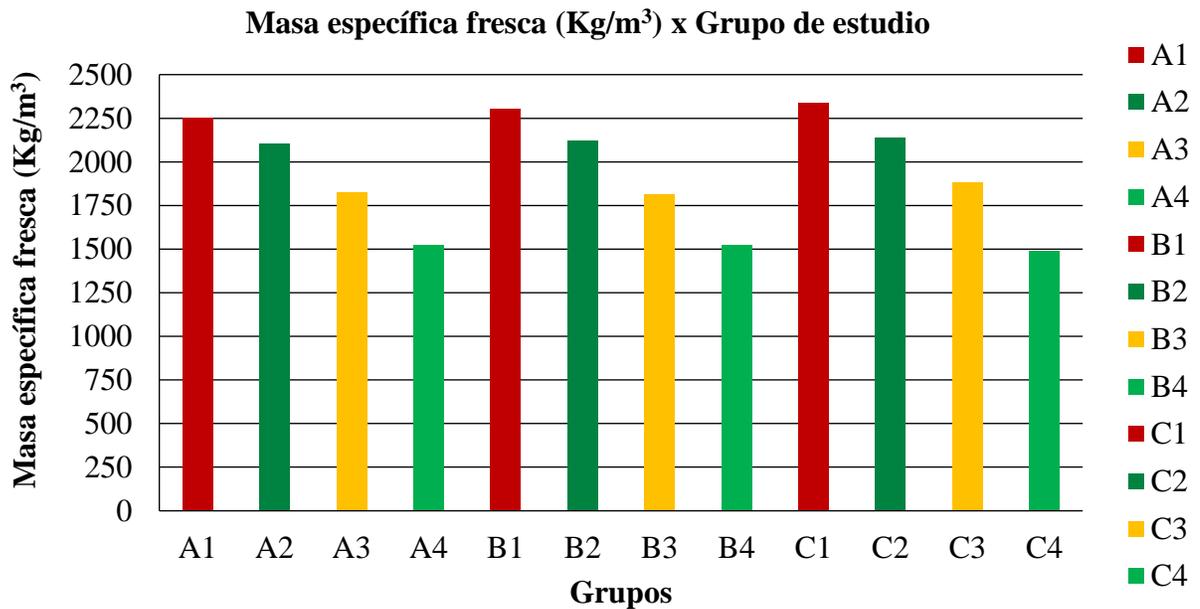


Figura 2. Gráfico peso específico x grupos del estudio

La Fig. 3 presenta el gráfico como las concentraciones de aire incorporado obtenidos en el concreto fresco para los diferentes grupos de estudio evaluados.

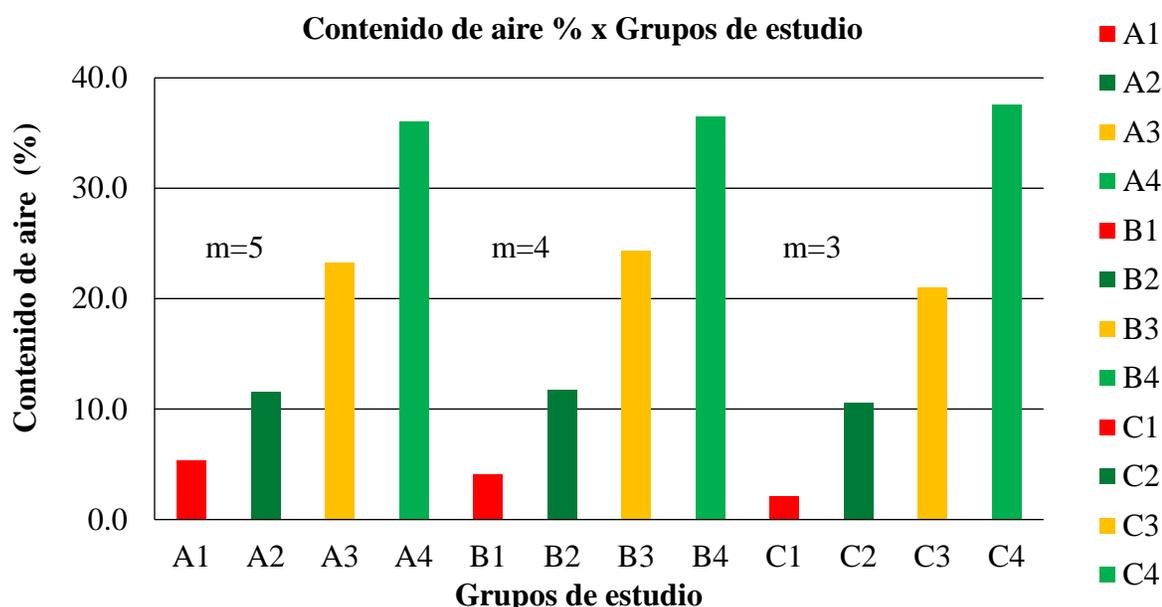


Figura 3. Gráfico de contenido de aire x grupos de estudio

3.1 Relación entre peso específico en estado fresco y resistencia a la compresión

En la Tabla 6 son presentados los resultados encontrados en los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días y 28 días de acuerdo con la (ABNT NBR 5739, 2007), equivalente a (ASTM C39/C39M, 2018), comparados con el peso específico definido en el objetivo inicial del trabajo. Para cada familia de estudio los ejemplares fueron compuestos por dos probetas cilíndricas, siendo presentado el mayor valor del par ensayado, considerado representativo de la muestra.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de resistencia promedio a la compresión

Grupo	Peso específico del estudio (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)	
		7 días	28 días
A (1:5) a/c = 0,63	2300	32,6	40,8
	2000	18,4	23,3
	1700	7,7	9,8
	1500	1,8	2,1
B (1:4) a/c = 0,50	2300	43,2	54,6
	2000	20,7	29,2
	1700	7,6	11,0
	1500	1,1	1,8
C (1:3) a/c = 0,43	2300	50,0	65,4
	2000	22,1	28,7
	1700	14,7	18,0
	1500	1,6	2,2

A partir de los datos obtenidos y presentados de resistencias a la compresión (Tabla 4) y de las relaciones agua-cemento (Tabla 3) para los concretos considerados en el presente estudio, fueron generados los gráficos (Figuras 8, 9 y 10) para el análisis de la influencia de la relación agua/cemento y de la resistencia a la compresión para cada grupo de Peso específico evaluado.

La correlación existente entre la relación agua/cemento y la resistencia, factor determinante en el estudio de los concretos se constató por el modelo de Abrams, es nítidamente notorio para los concretos de clase convencional (pesos específicos de 2300kg/m³ y 2000kg/m³). Para los concretos de clase liviano, contemplados en el estudio (pesos específicos de 1700kg/m³ y 1500kg/m³) la relación a/c por sí sola no es el único parámetro determinante del comportamiento relativo a la resistencia.

Una vez que se adicionó el aditivo incorporador de aire a la mezcla, se verificó visualmente una mejora de la cohesión de los materiales, sin que hubiese habido variaciones en los valores de los asentamientos en concretos con pesos específicos de 2300, 2000 y 1700kg/m³. Ahora los concretos con pesos específicos de 1500kg/m³ presentaron pequeños aumentos en los valores de los asentamientos, variando entre 190mm y 210mm.

De acuerdo con la (ABNT NBR 12655, 2015), equivalente a (ASTM C1084, 2010), de forma general, los consumos de cementos en concretos con menores pesos específicos se muestran inferiores a los de mayores pesos, como era esperado por (Romano, R. C. O. et. al., 2017), ya que la inclusión de los aditivos incorporadores de aire, para niveles semejantes de consistencia. Además de eso para un valor de “m” mayor, estaba asociado a consumos de cemento menores. Sigue presentado en la Figura 4 el gráfico con las curvas obtenidas para cada peso específico de los consumos de cemento calculados.

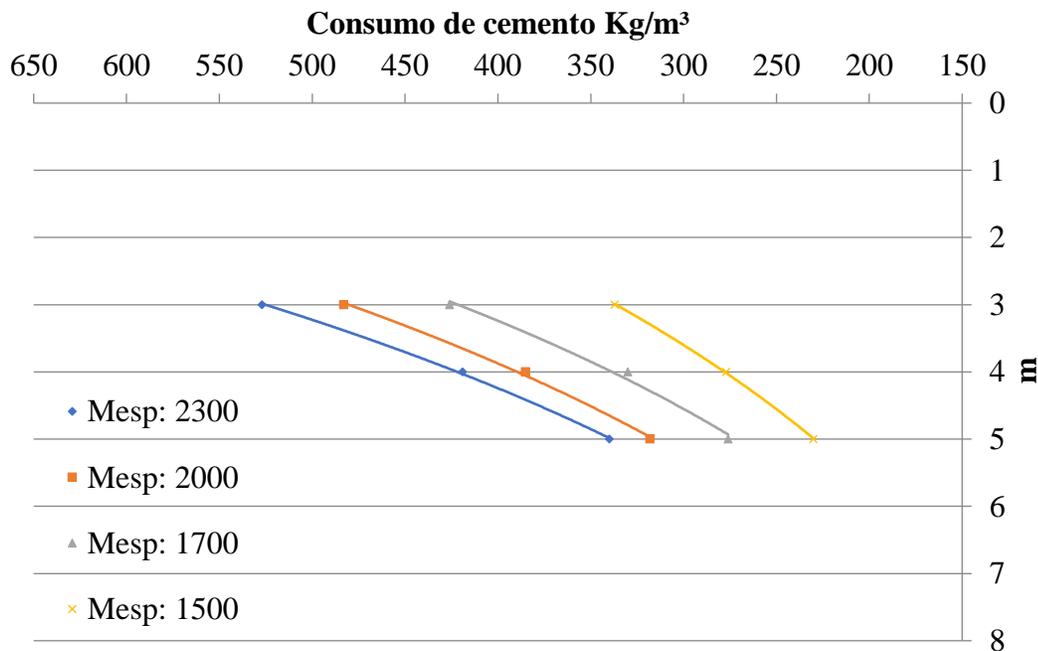


Figura 4. Consumo de cemento para los pesos específicos

3.2 Relación entre peso específico fresco y absorción de agua, índice de vacíos y peso específico seco.

Los pesos específicos secos, obtenidos por medio del ensayo del concreto endurecido, presentaron variaciones en relación con los valores iniciales de aquellos estipulados para los parámetros de peso específico del estudio. Eso se debe a las diferentes pérdidas de agua a que los concretos están sometidas una vez en el proceso de endurecimiento.

Los valores obtenidos en los ensayos de índices de vacíos corroboran la idea de que los concretos con pesos específicos menores presentan índice de vacíos mayores en su estructura, además de eso, presentaron valores mayores de absorción de agua. Para la visualización de estas características, la Figura 5 relaciona las 3 propiedades.

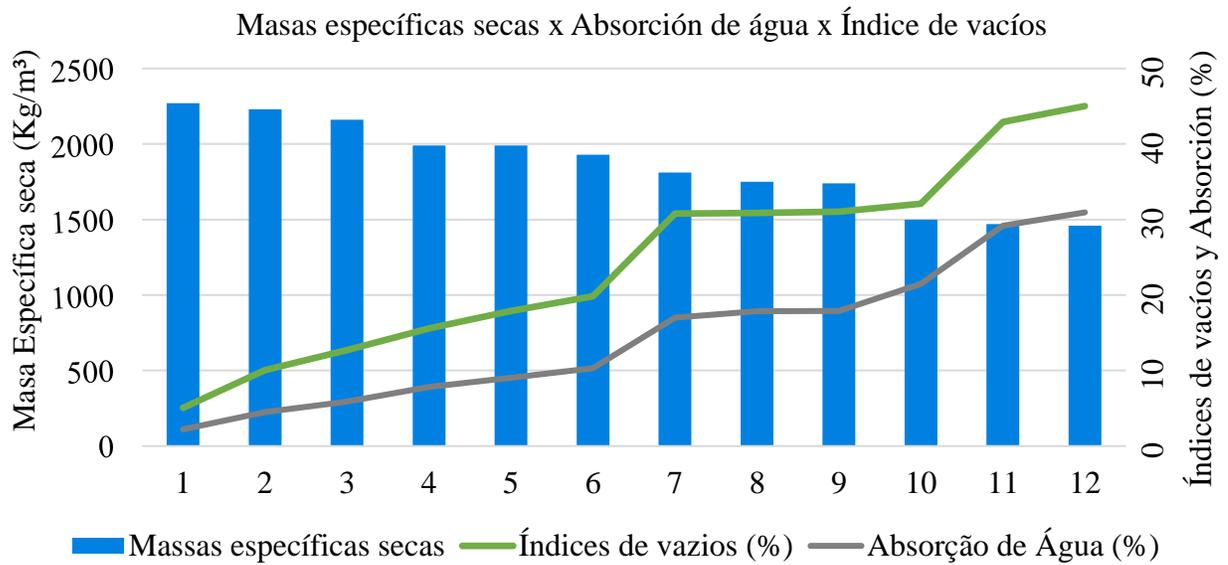


Figura 5. Relaciones entre pesos específicos, índice de vacíos y absorción de agua

La Figura 6 presenta la relación entre el peso específico y el índice de vacíos para las muestras, de acuerdo con la NBR 9778 (2009), con la norma internacional equivalente (ASTM C29/C29M, 2017).

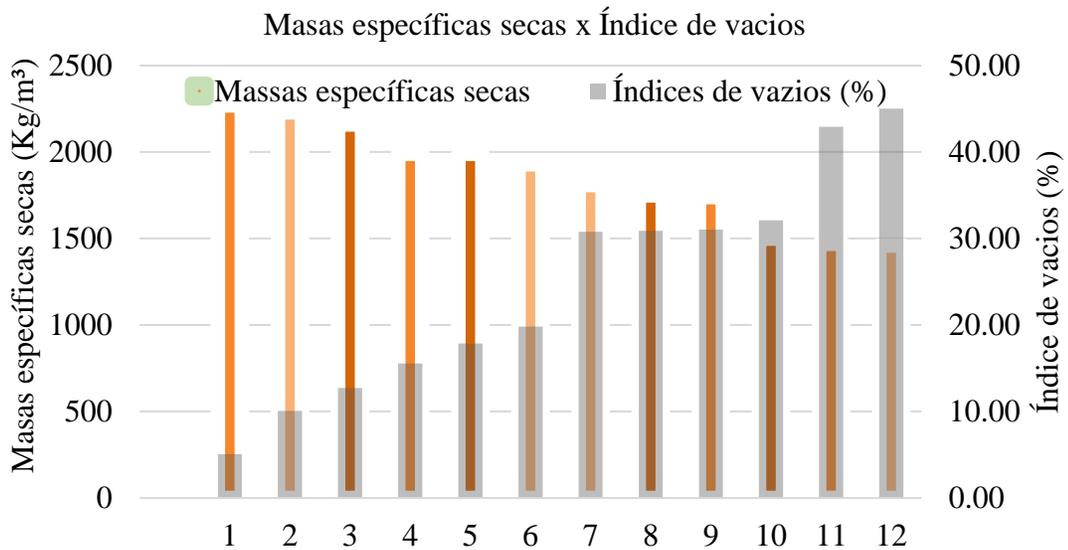


Figura 6. Relaciones entre pesos específicos, índice de vacíos.

3.3 Relación entre peso específico fresco y absorción capilar

Fue objeto del estudio evaluar las tasas de absorciones capilares de los concretos dosificados, teniendo como objetivo verificar las propiedades involucradas y su reflejo evidenciado en la capilaridad. Por tanto, fueron ensayados los concretos de las 12 dosis presentes en el estudio de acuerdo con las normas (ABNT NBR 9779, 2012), equivalente a (ASTM C1585, 2013).

En el caso específico de la absorción capilar la relación de mayor influencia observada estaba asociado al peso específico del concreto (obtenida a través de la incorporación de aire), además de eso la relación agua/cemento se mostró más influyente que en los ensayos de absorción, índice de vacíos y peso específico seca.

La Figura 7 ilustra el gráfico obtenido de las propiedades consideradas, peso específico y absorción capilar para las 12 dosis clasificadas en orden decreciente de pesos específicos.

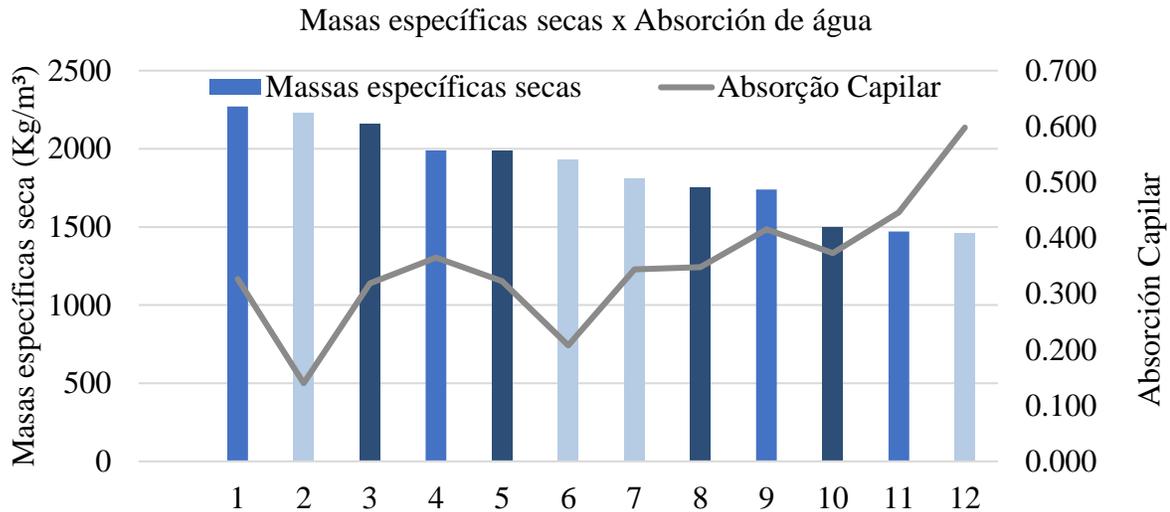


Figura 7. Relaciones entre pesos específicos, absorción capilar

Además, se observa que para los concretos sin uso de aditivo incorporador la absorción capilar acompañó muy bien la variación en la relación agua/cemento. Para los demás concretos, hubo variaciones en los resultados. Sin embargo, es posible visualizar a través de la interpretación gráfica una tendencia de la curva de absorción en crecer a medida en que los valores de pesos específicos disminuyen. Puede decirse que la variable relación a/c, si tiene influencia, pero una influencia no unívoca en el comportamiento presentado por los resultados.

3.4 Relación entre masa específico seco y resistencia a compresión

Evaluando la relación existente entre los pesos específicos de los concretos en estado seco y los valores de resistencia a la compresión obtenidos fueron realizados en los gráficos de las Figuras 8, 9 y 10, evidenciando que las propiedades poseen fuerte correlación.

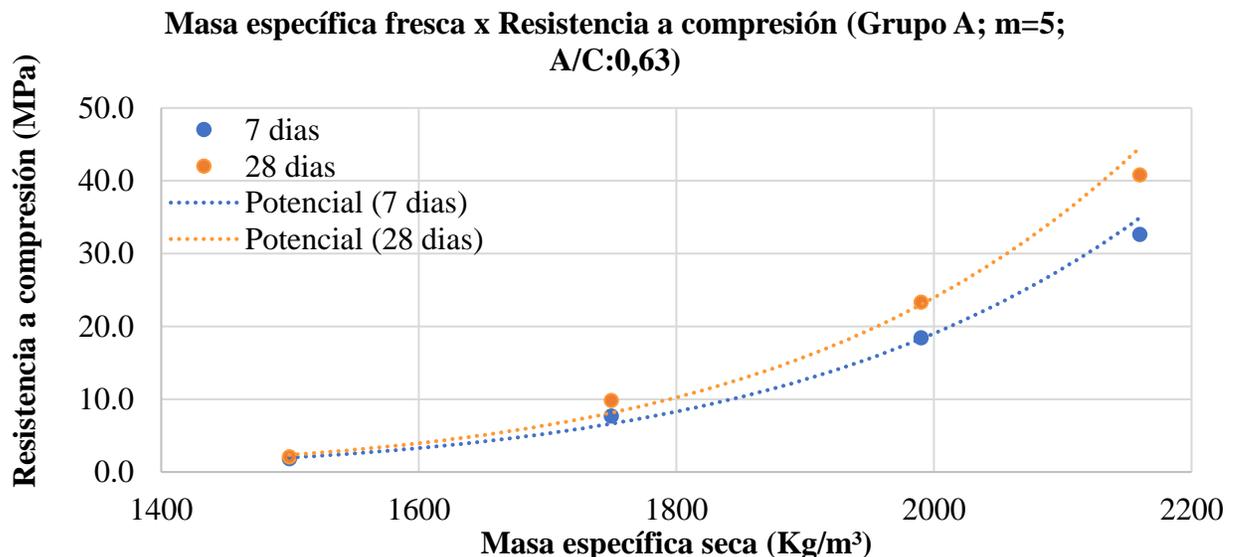


Figura 8. Resistencia a la compresión y masas específica - m=5

Masa específica fresca x Resistencia a la compresión (Grupo A; m=5; A/C:0,63)

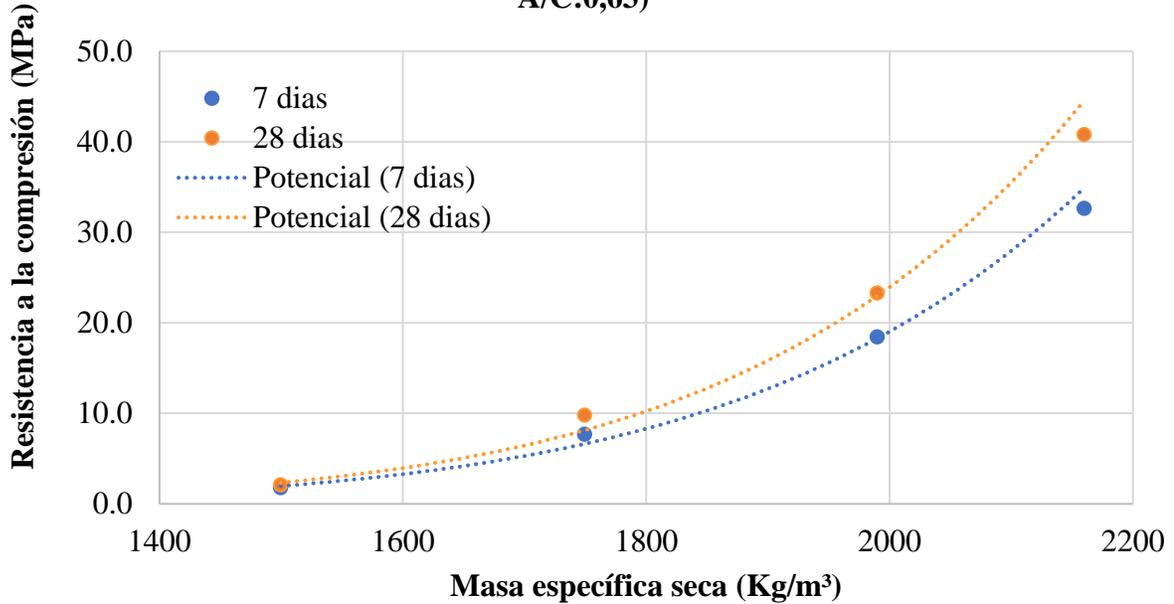


Figura 9 - Resistencias a la compresión y pesos específicos - m=4

Masa específica fresca x Resistencia a compresión (Grupo C; m=3; A/C:0,43)

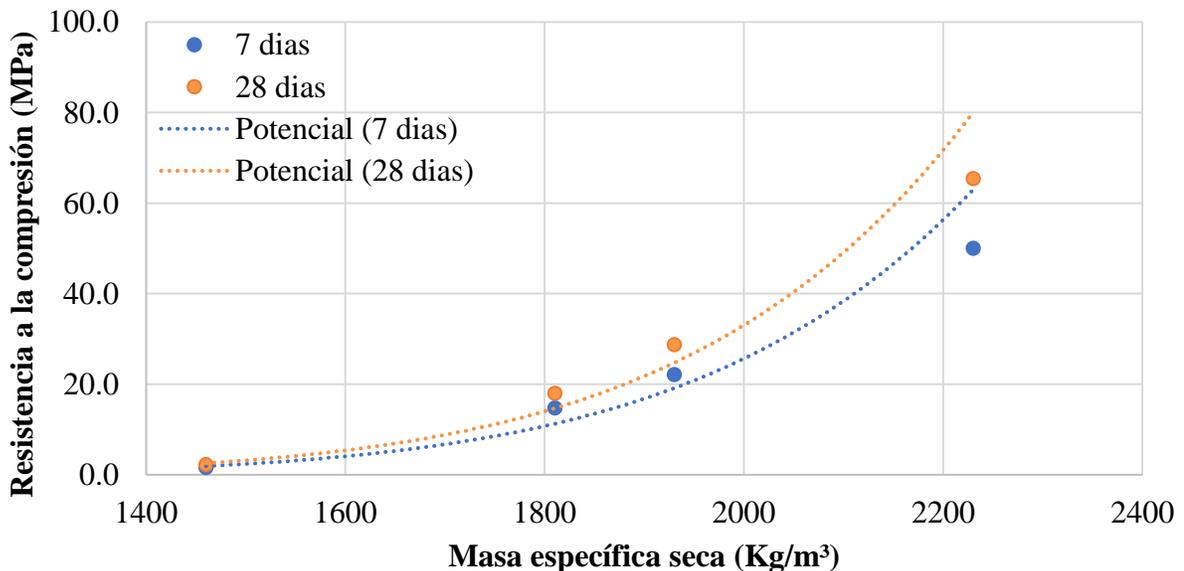


Figura 10. Resistencias a la compresión y pesos específicos - m=3

Los resultados reflejan valores de resistencia a la compresión mayores para mayores densidades. Se puede observar que, con el aumento de los vacíos en concretos, acarrear en menores pesos específicos, ocurre también la reducción de sus resistencias mecánicas. Por la (NBR 12646, 1992), valores de resistencia a la compresión para lotes de concretos celulares deben atender al mínimo de 2,5MPa.

Se verificó que para un mismo concreto, como era previsto el aumento de la incorporación de aire promovía una reducción en el específico y en consecuencia la reducción de las resistencias

mecánicas de los mismos. Esta variación tuvo un comportamiento influenciado principalmente por dos propiedades: el aumento de los vacíos en los concretos y la relación agua/cemento utilizada. Se constató en el estudio que los concretos con pesos específicos cercanos de 1500 kg/m^3 , es decir, aquellos con mayor incorporación de aire, tenían su comportamiento prácticamente guiado, del punto de vista de las resistencias mecánicas, por la cantidad de vacíos en su interior, quedando en un segundo plano la relación agua/cemento adoptada.

Los resultados presentados corroboran con los resultados obtenidos por Teixeira Filho (1992), en su desarrollo experimental, donde uno de los resultados observados fue la distinción de la influencia de la relación agua/cemento cuando son observadas diferentes clases de peso específico. Para concretos con pesos específicos de 1100 kg/m^3 y 1300 kg/m^3 , el aumento de la relación agua/cemento de 0,5 para 0,6 presentó como resultado un aumento en la resistencia de estos. Ya para la clase de concretos con peso específico de 1700 kg/m^3 y 1900 kg/m^3 , el mismo aumento en la relación agua/cemento de 0,5 para 0,6, presentó como resultado valores menores de resistencia a la compresión.

En este estudio es observado también, por ejemplo, para las dosis con pesos específicos de 1500 kg/m^3 , donde para una relación agua/cemento de 0,63 la resistencia a la compresión axial es superior a una dosificación con relación agua/cemento de 0,50.

Para los resultados obtenidos, se puede considerar que los cambios en la influencia de las relaciones a/c, en peso en la resistencia a la compresión axial se justifican por la reducción de SUS pesos específicos y aumento de los vacíos de los concretos (Teixeira Filho, 1992).

Además de eso se observó en el estudio que concretos con peso específico en el orden de 1900 kg/m^3 poseen propiedades mecánicas interesantes, con valores de resistencia a la compresión en el rango de los 20 MPa, aliadas a los beneficios posibles de la incorporación de aire, tales consumos reducidos menor peso propio de los elementos y mejorías en el confort térmico y acústico frente al concreto convencional.

Tratándose de los fenómenos de capilaridad, los concretos evaluados presentaron aumento en la absorción capilar con la disminución de SUS pesos específicos.

Es sabido que la permeabilidad de los concretos es un factor crucial para la durabilidad de estos. Cuanto más permeable los concretos, más susceptibles a las acciones deletéreas de agentes presentes en el ambiente. Así que atención especial debe ser dada cuando el uso de concretos que presentan índices de vacíos elevados y alta capilaridad, como el caso presente de este estudio.

3.5 Relación entre peso específico en estado fresco y profundidad de carbonatación.

Con la intención de evaluar los concretos estudiados desde el punto de vista del fenómeno de carbonatación, fueron separadas 12 probetas, restantes de los ensayos de absorción total, para ser utilizados en la evaluación. Una vez que el ensayo anterior no era destructivo, se puede evaluar estos concretos sometidos a la acción atmosférica del ambiente del laboratorio, donde permanecieron por períodos de 110 días de exposición.

Para la realización del ensayo se utilizó el procedimiento descrito en (Rilem, 1988), y se siguió la sección de las probetas de dimensiones $10 \times 20 \text{ cm}$, a $1/3$ de una de sus caras.

Posterior a la sección, las probetas fueron rociadas con una solución de fenolftaleína (2%) para identificación del pH. La zona de transición donde ocurre el avance del frente de carbonatación, por poseer pH abajo de 9 tiende a quedar incoloro en presencia de la solución la zona con pH superior a 9, tiene a quedar con coloración violeta.

Así, fue posible identificar el frente de carbonatación formado y se observa en las Figuras 10 y 11.



Figura 10. Medición de la profundidad de carbonatación para peso específico de 1500 kg/m³



Figura 11. Medición de la profundidad de carbonatación para peso específico de 1700 kg/m³

Tabla 5. Valores medidos de profundidad de carbonatación

Grupo	A/C	1:m	Subgrupo	Peso específico (kg/m ³)	Profundidad de Carbonatación (mm)
A	0,63	1:5	1	2300	0,97
			2	2000	1,87
			3	1700	3,54
			4	1500	18,75
B	0,5	1:4	1	2300	0
			2	2000	1,27
			3	1700	1,59
			4	1500	18,92
C	0,43	1:3	1	2300	0
			2	2000	0,84
			3	1700	1,6
			4	1500	10,68

En esta evaluación, desde el punto de vista de profundidad de carbonatación, se verifica que los concretos aligerados poseen avance de frente de carbonatación muy superior a los concretos convencionales. Aunque aquellos concretos con una relación agua/cemento reducida, en el caso de los del grupo C (a/c:0,5), presentaron, para los pesos específicos menores (1500 y 1700 kg/m³) profundidades de carbonatación significativas para los 110 días de edad del ensayo.

4. CONCLUSIÓN

El presente estudio evaluó las repercusiones de la reducción del peso específico del concreto en las propiedades mecánicas y de durabilidad. El interés por el uso de concretos con incorporador de aire ha crecido bastante, sobre todo en obras de pared vaciadas en el local, que generalmente poseen muchas repeticiones. Esa solución se destaca por la tendencia a un mejor comportamiento térmico, cuando es comparado al concreto de densidad normal, lo que es imprescindible en regiones de temperaturas elevadas, como el noreste brasileño. Asociado a eso es esperada una reducción expresiva del consumo de cemento en la medida que se reduce la densidad del concreto, a pesar de la eventual compensación financiera que resulta de la inclusión de los aditivos incorporadores de aire. Por ello es fundamental que esos beneficios sean confrontados como el eventual comprometimiento de la durabilidad de las piezas por cuenta de la mayor facilidad a la entrada de agentes agresivos es muy notorio para los iones cloruro y el anhídrido carbónico.

Los ensayos encontrados comprobaron la fuerte influencia de la reducción del peso específico del concreto en su comportamiento mecánico y principalmente de durabilidad. Se percibe incrementos expresivos de la absorción de agua (3% a 30%), índice de vacíos (5% a 50%), absorción capilar ($0,2 \text{ g/cm}^2$ a $0,6 \text{ g/cm}^2$) y en la profundidad de carbonatación (0 mm a 18,9 mm) en la medida en que se disminuye el peso específico del concreto.

Así, los resultados apuntan para la necesidad de adoptar de medidas de protección superficial del concreto para su uso en regiones agresivas, a fin de permitir los beneficios (especialmente financieros y económicos) de la técnica, sin comprometimiento de su durabilidad. En lo que se refiere a los agentes de protección, es preciso también evaluar la necesidad imperativa de mantenimiento, a fin de asegurar su adecuado comportamiento a lo largo de los años.

5. REFERENCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Procedimento*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12646 - Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Especificação*. Rio de Janeiro, Brasil.

ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard Specification for Portland Cement*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17

ASTM International. (2013). *ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1585-13>

- ASTM International. (2010). *ASTM C1084-10 Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1084-10>
- ASTM International. (2017). *ASTM C231/C231M-17a Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A
- ASTM International. (2018). *ASTM C39/C39M-18 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17A
- Bauer, L. A. F. (1994), *Materiais de Construção*: 5.ed. Rio de Janeiro: ABDR Afiliada, v.1.f
- Corsini, R. (2011) *Paredes normatizadas. Norma inédita para paredes de concreto moldadas in loco entra em vigor e promete impulsionar uso da tecnologia em edificações*. In: Revista Técnica, No. 183. Dezembro de 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/183/paredes-normatizadas-norma-inedita-para-paredes-de-concreto-moldadas-287955-1.aspx>>
- Du, L., Folliard, J. K. (2005), *Mechanisms of air entrainment in concrete*. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 8, p. 1463-1471. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>
- Fujii, A. L., Torres, D. R., Romano, R. C. O., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud*. Construction & Building Materials, v. 101, p. 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.057>
- Helene, P., Andrade, T. (2007), *Concreto de cimento Portland*. In: Isaia, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. V2, Cap. 27, p. 905 -944.
- Kumaran, K., Lackey, J., Normandin, N., Van Reenen, D., Tariku, F. (2004), "*Heat, Air and Moisture Transport Properties of Several North American Bricks and Mortar Mixes*", Journal of Testing and Evaluation, v. 32, n. 5, pp. 383-389. <https://doi.org/10.1520/JTE12079>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2ª ed. IBRACON. p. 313.
- Helene, P., Terzian P. (1992), *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*, São Paulo, SP, Ed. Pini.
- RILEM TC (1994). *CPC 18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1988*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. e-ISBN: 2351580117, Publisher: E & FN SPON, Pages: 56 – 58, RILEM.
- Rossignolo, J. A. (2009), *Concreto Leve Estrutural. Produção, Propriedades Microestrutura e Aplicações*. São Paulo: Editora Pini.
- Romano, R. C. O., Torres, D. R., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars*. Construction & Building Materials, v. 82, p. 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.067>
- Romano, R. C. O., Maciel, M. H., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2017), *Monitoring of hardening of Portland cement suspension by Vicat test, oscillatory rheometry, and isothermal calorimetry*. APPLIED RHEOLOGY, v. 27, p. 36006. <http://doi.org/10.3933/ApplRheol-27-36006>
- Teixeira Filho, F. J., Tezuka, Y. (1992), *Considerações Sobre Algumas propriedades dos Concretos Celulares Espumosos*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo. EPUSP.
- Torres, D. R., Fujii, A. L., Romano, R. C. O., Pileggi, R. G. (2014), *Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais cimentícios*. Ambiente Construído (Online), v. 14, p. 141-152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000200010>

Whiting, D. A., Saak, A. W., Jennings, H. M. (1999), *The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste*. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 9, September 1999, Pages 1491-1496. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00124-6)

Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante

O. Ojeda-Farías¹ , J. M. Mendoza-Rangel^{1*} , M. A. Baltazar-Zamora² 

*Autor de Contacto: jose.mendozarn@uanl.edu.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

Recepción: 11/12/2017 | Aceptación: 26/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del Cemento Portland Compuesto (CPC) para mejorar las propiedades de un suelo granular arenoso. Se llevaron a cabo ensayos de compactación AASHTO estándar, resistencia a la compresión simple y CBR, comparándose el comportamiento del suelo natural en estudio y mezclado con porcentajes de 3%, 5% y 7% de cemento portland como porcentajes de control, realizándose sustituciones parciales del mismo por CBCA en porcentajes de 0%, 25%, 50% y 100% con respecto al peso del suelo en estado seco. Los resultados mostraron mejoras en el suelo en las características de compactación, resistencia a la compresión y CBR, reduciéndose hasta un 25% el consumo del CPC.

Palabras clave: ceniza de bagazo de caña de azúcar; compactación, CBR, suelos; subrasante.

Citar como: O. Ojeda-Farías, J.M. Mendoza-Rangel, M. A. Baltazar-Zamora (2018), “Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N.L, México.

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, Xalapa, Veracruz, México.

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material

ABSTRACT

The aim of the present work was study the influence of sugar cane bagasse ash (SCBA) as a partial substitution of Compound Portland Cement (PCC) in order to enhance the properties of a granular sand soil. AASHTO standard compaction test, unconfined compressive strength test, and CBR test were made, has been compared the behavior of natural soil in study and mix with percentages of 3%, 5% and 7% of PCC as a control percentage, being carried out partial substitutions of PCC by SCBA in 0%, 25%, 50% and 100% percentages with respect to dry soil weight. The results showed enhances in the compacting, CBR and unconfined compressive strength features, reducing up to 25% the consumption of PCC.

Keywords: sugar cane bagasse ash; compaction; CBR; soil; subgrade.

Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre compactação, CBR e resistência à compressão não confinada de um material granulado de sub-esmagamento

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como uma substituição parcial do Cimento Portland Composto (CPC), a fim de melhorar as propriedades de um solo de areia granular. O teste de compactação padrão AASHTO, a resistência à compressão não confinada e a CBR foram feitas, foi comparado o comportamento do solo natural em estudo e mistura com porcentagens de 3%, 5% e 7% de CPC como porcentagem de controle, sendo realizadas substituições parciais de CPC por CBCA em porcentagens de 0%, 25%, 50% e 100% em relação ao peso do solo seco. Os resultados mostram aprimoramentos nos recursos de compactação, CBR e resistência à compressão não confinada, reduzindo até 25% o consumo de CPC.

Palavras chave: cenoura de bagaço de cana de açúcar; compactação; CBR; solo; subtração.

1. INTRODUCCIÓN

En obras de infraestructura vial, los suelos encontrados en la zona de proyecto son los materiales principalmente empleados para la construcción de terraplenes, por lo tanto, su desempeño es de vital importancia para una adecuada vida de servicio en cualquier estructura en función. Estos suelos al ser empleados en obras de ingeniería deben cumplir requisitos de calidad establecidos en normativas internacionales, y de no cumplir dichos requerimientos se debe recurrir a métodos de mejoramiento, principalmente en sus características de estabilidad volumétrica y resistencia (Fernández Loaiza, 1982; Jofre et al., 2008; Juárez & Inzunza, 2011).

El mejoramiento de un suelo está fuertemente relacionado con el proceso de compactación y la adición de agentes estabilizadores e influyen directamente en el control de calidad de las capas conformadas, buscando obtener estructuras de suelo resistentes, económicas y con aportes a la sustentabilidad (Rico-Rodriguez & Del Castillo, 2006).

De lo anterior la adición de agentes que actúan mediante principios físico-químicos ha sido una de las técnicas mayormente empleadas en el tratamiento de suelos, sustancias como la cal, cemento portland, asfalto, ceniza volante, escoria de alto horno, ceniza de cascarilla de arroz entre otras, han sido objeto de investigación y análisis sobre su influencia en suelos de diversas clasificaciones (Behak & Perez Nuñez, 2008; Cristelo, Glendinning, Miranda, & Oliveira, 2012; Sargent, Hughes,

Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante

Rouainia, & Glendinning, 2012; S. Correia & Graca Rasteiro, 2016) observándose incrementos en resistencia y durabilidad debido a los procesos físico-químicos que ocurren en las mezclas y que además en el caso de las puzolanas se han empleado con el objetivo de reducir el consumo de cemento portland, cal y asfalto debido a la alta demanda energética y generación de CO₂ durante su procesamiento.

Actualmente la CBCA es uno de los materiales suplementarios con mayor número de investigaciones como material suplementario al cemento portland en mezclas de concretos y morteros (Moraes et al., 2015), siendo una alternativa reciente en el mejoramiento de los suelos en sus características físicas como el confinamiento, densificación y estabilidad volumétrica, y químicas a través de las reacciones del agente estabilizador (cemento o cal) con el agua y en casos excepcionales con los constituyentes del suelo (arcillas principalmente), donde su empleo como material de construcción contribuiría a resolver la problemática de generación y disposición de residuos agroindustriales, que tan solo en México sus 57 ingenios azucareros en la zafra 2016-2017 molieron 53,308,643 toneladas de caña de las 777,078 hectáreas cosechadas, obteniéndose 15,222,471 toneladas de bagazo (CONADESUCA, 2017) que una vez calcinado se convierte en ceniza cuya disposición final no está determinada. En diversos estudios se ha reportado que la combustión del bagazo de caña en las calderas de los ingenios genera un subproducto denominado ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), con elevados contenidos de sílice y alúmina como óxidos principales, que en condiciones adecuadas reacciona con el hidróxido de calcio, generándose una actividad puzolánica (Cordeiro & Kurtis, 2017). Esta actividad puzolánica está en función del tamaño de las partículas, contenido de material amorfo (aluminosilicatos), hidróxido de calcio presente y contenido adecuado de humedad, haciendo mención algunos investigadores, que la ceniza no consumida durante la reacción puede servir como material de relleno, ocupando los espacios vacíos presentes en el material compuesto (Sing, Singh, & Rai, 2000; Cordeiro, Toledo Filho, Tavares, & Fairbairn, 2008; Cordeiro, Toledo, & Fairbairn, 2009; Morales, Villar Cociña, Frias, Santos, & Savastano, 2009; Arenas Piedrahita et al., 2016; Joshaghani & Amin, 2017;) y donde en un suelo dinámicamente compactado ofrecería una alternativa para incrementar su estabilidad por efecto del sellado de poros en el suelo compactado y una posible reacción puzolánica a edades tardías.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la sustitución parcial de CPC por CBCA en las propiedades de compactación, resistencia a la compresión y CBR de un suelo granular arenoso, con el fin de mejorar sus características mecánicas y ser empleado en una capa estructural de pavimento, aprovechando un material de desecho agroindustrial y reduciendo los porcentajes de cemento empleados en estabilización de suelos, que a pesar de ser porcentajes pequeños de adición, terminan generando un impacto económico y ambiental por la creciente construcción de kilómetros de carreteras a lo largo del mundo.

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.1 Materiales

Los materiales empleados en este estudio fueron cemento portland compuesto, clasificado como tipo III o CPC 30R de acuerdo con la normativa vigente (ASTM C150, 2017; NMX C414, 2004) con una densidad de 3.11 g/cm³. Ceniza de bagazo de caña obtenida en el ingenio Mahuixtlan municipio de Coatepec, Veracruz, México. La ceniza fue muestreada de una de las calderas donde la temperatura de combustión fue alrededor de los 700 °C. Una vez recolectada y enfriada fue sometida a un proceso de molienda a 1500 rpm durante 1 hora, recuperando el material pasante por el tamiz No 200 y cuya densidad fue de 2.1 g/cm³. El tratamiento de molienda se aplicó con el objetivo de reducir las partículas a un tamaño menor de 75 micras y así incrementar su área superficial específica, la cual está correlacionada con el incremento de la reactividad puzolánica de

la CBCA como lo han descrito diversos autores (Cordeiro G. C., Toledo Filho, Tavares, & Rego Fairbairn, 2009; Cordeiro & Kurtis, 2017).

El suelo empleado en este estudio fue obtenido del banco de materiales del Castillo, municipio de la ciudad de Xalapa, Veracruz México. El muestreo, identificación, preparación de las muestras y ensayos de calidad fueron efectuados como lo establecen los procedimientos de análisis y evaluación de materiales empleados en la conformación de terraplenes (ASTM D 2217, 1998; ASTM D 421, 2007; ASTM D 2216, 2010; ASTM D 698, 2012; ASTM D 4318, 2017).

1.2 Caracterización de materiales.

Se ha obtenido la composición química en óxidos de la CBCA en estudio mediante análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), además se han determinado las fases presentes en la ceniza mediante difracción de rayos X (DRX), la morfología y características superficiales han sido observadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) determinándose también la distribución de tamaño de partículas (DTP) de la CBCA empleada mediante análisis granulométrico por difracción laser, con el fin de conocer el tamaño promedio de las partículas de ceniza.

1.3 Diseño de mezclas de suelo

Para el diseño de las mezclas se emplearon tres porcentajes de adición de cemento portland de acuerdo con la clasificación del material, y que para suelos granulares como el caso de la arena empleada en este estudio los porcentajes de adición deben estar por debajo del 10%, con el fin de evitar agrietamientos debido a un exceso de rigidez, tal como lo establecen diversas prescripciones técnicas (Jofre et al., 2008; Juarez Gutierrez & Inzunza Ortiz, 2011). Los porcentajes utilizados fueron 3%, 5% y 7% con respecto al peso del suelo seco. Se establecieron las sustituciones parciales de CPC por CBCA en cada porcentaje anteriormente seleccionado, empleando 0%, 25%, 50% y 100%, haciendo un total de 12 mezclas.

1.4 Características de compactación.

La compactación es un proceso mecánico que mejora las características de resistencia de los materiales que constituyen secciones estructurales en carreteras, para ello se transfiere una energía de impacto por volumen unitario de suelo obteniendo una curva de compactación de la cual se extraen los parámetros de masa volumétrica seca máxima y humedad óptima del material. Para este trabajo la relación entre la densidad seca máxima y la humedad óptima fue determinada en cada mezcla, esto con el fin de analizar la variación en sus valores como consecuencia de las adiciones y como datos para la posterior elaboración de especímenes suelo-cemento. Las pruebas fueron efectuadas como lo establece el procedimiento para materiales granulares en moldes de 944 cm³, empleando la compactación dinámica con pisón de 2.5 kg de peso y 30.48 cm de altura de caída (ASTM D558, 2011).

1.5 Ensayos CBR

El CBR es una prueba de resistencia a la penetración que compara la capacidad de soporte de un material en estudio con uno de piedra triturada bien graduada como referencia (100% de CBR), para ello se aplica carga a un pistón con una deformación de 1.3 mm por minuto registrando las cargas desde 0.64 mm a 7.62 mm; En este trabajo se determinó el valor de soporte california (CBR) en cada una de las mezclas descritas anteriormente, para ello, por cada mezcla fueron compactados dinámicamente en moldes de acero tres especímenes por prueba a contenido óptimo de agua, para posteriormente colocarles las sobrecargas que establece la normativa y sumergirlos en agua durante 24 h simulando las condiciones más críticas, seguido de su ensayo en la prensa de carga a la velocidad de deformación anteriormente descrita (ASTM D1883, 2016).

1.6 Resistencia a la compresión simple

Para evaluar la resistencia a la compresión de cada mezcla, se elaboraron especímenes suelo-cemento, suelo-cemento-ceniza a un grado de compactación de cien por ciento. Estos especímenes fueron fabricados como lo indica el procedimiento de prueba para suelos estabilizados con cemento (ASTM D558, 2011), empleando los valores de las características de compactación obtenidas previamente. Las dimensiones de los especímenes fueron de 101.6 mm de diámetro por 116.4 mm de altura, con una relación diámetro altura de 1.15, extraídos del molde con ayuda de un extractor mecánico, para un posterior curado de 7 días sin contacto directo con el agua. El ensaye de los especímenes fue efectuado siguiendo el procedimiento de prueba de resistencia a la compresión en especímenes suelo-cemento (ASTM D1633, 2017), para ello previo al ensaye los especímenes fueron sumergidos en agua por un periodo de 4 h obteniendo así las condiciones más críticas, para después aplicar axialmente la carga mediante una prensa automática.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Caracterización físico-química de materiales.

En la Tabla 1 se presenta la caracterización realizada al suelo en estudio, en ella se muestran los parámetros geotécnicos de este material, se puede observar que el material predominante es la arena con 89.5% pasando la malla No 4 y un 20.7% pasando la No 200, y que de acuerdo a los resultados de plasticidad, no existe intervalo entre el límite líquido y límite plástico concluyéndose que los finos presentes en el suelo son no plásticos, es decir se tiene un material con características completamente granulares con una gravedad específica de 2.0, que de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos corresponde a un SM con finos no plásticos (ASTM D 2487, 2011). En cuanto a las características de compactación se tiene que con una humedad del 21.7% se obtiene una densidad seca máxima de 1311 kg/m³, y que a esa densidad el valor de soporte california se encuentra en 24% con 0 % de expansión, cumpliendo con las características para ser empleado en capa subrasante como lo establecen las normas mexicanas (Rico Rodríguez, Orozco y Orozco, Telles Gutierrez, & Perez García, 1990)

Tabla 1 Características geotécnicas del suelo granular arenoso en estudio.

Propiedades	Resultados
Humedad Natural (%)	22.38
Pasa la malla 3" (%)	100
Pasa la malla No 4 (%)	89.50
Pasa la malla No 200 (%)	20.70
Límite líquido (%)	31.2
Límite Plástico (%)	N/P
Índice Plástico (%)	N/P
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1311
Humedad Óptima (%)	21.7
Densidad	2.0
Valor Relativo de Soporte (%)	24.5
Expansión (%)	0

La Tabla 2 presenta la composición química en óxidos de la CBCA, en ella se observa que la suma de óxidos principales (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) da un total de 73.069%, ubicándose por arriba del 70% como lo establece la norma para puzolanas, y que además se tiene un valor de pérdida por ignición de 1.5% clasificándola como puzolana clase N (ASTM C 618, 2017).

Estos resultados han sido contrastados con los de diferentes investigaciones que han empleado CBCA como material suplementario del cemento portland, obteniéndose consistencia con diversos autores (Frias, Villar, & Savastano, 2011; Ganesan, Rajagopal, & Thangavel, 2007).

Tabla 2 Composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en estudio.

Componente	Concentración
SiO ₂	62.66
Al ₂ O ₃	5.20
Fe ₂ O ₃	5.19
TiO ₂	0.64
CaO	4.87
MgO	2.19
SO ₃	0.30
K ₂ O	13.93
Na ₂ O	0.56
P ₂ O ₅	3.36
Densidad (g/cm ³)	2.1
P. Ignición (%)	1.5

La Figura 1 muestra las fases presentes en la CBCA mediante el patrón de difracción, en él se observa presencia de partículas amorfas en el halo localizado en la región 2θ de 10 - 40°, también se observa que la ceniza está compuesta principalmente por tridimita, cianita, óxido de potasio, óxido de hierro y óxido de silicio y aluminio, encontrándose como materiales cristalinos. Difractogramas similares han sido obtenidos por diversos autores, coincidiendo en señalar la región anteriormente descrita (Jagadesh, Ramachandramurthy, Murugesan, & Sarayu, 2015; Torres Rivas, Gaitan Arevalo, Espinoza Perez, & Escalante Garcia, 2014).

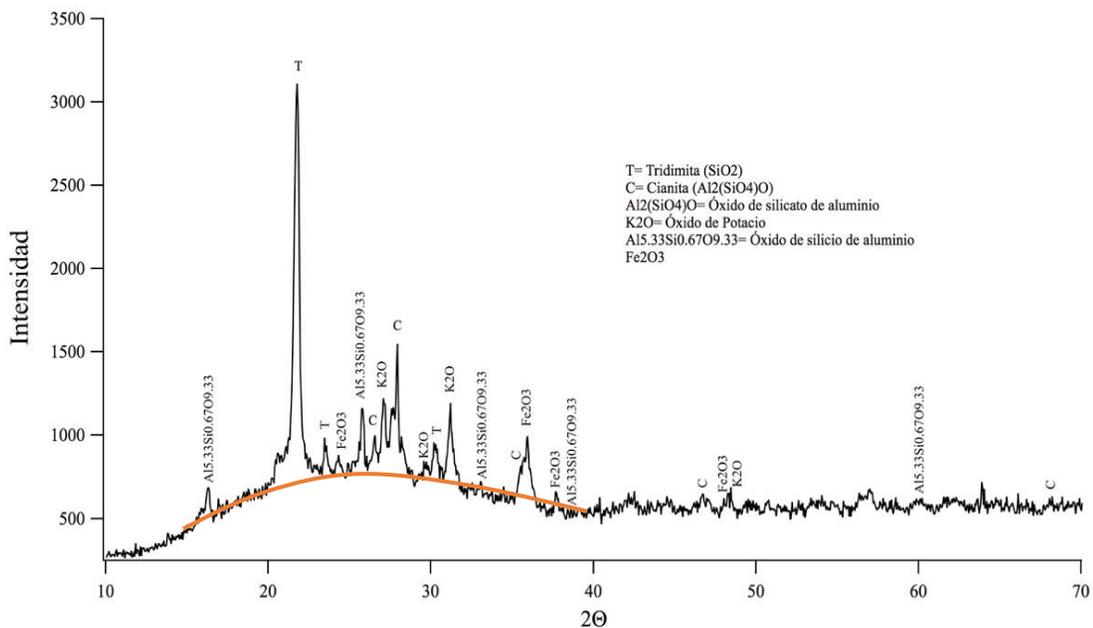


Figura 1 Resultados de DRX de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en estudio.

La Figura 2 muestra el análisis efectuado mediante MEB en la ceniza de bagazo de caña de azúcar, en ella se aprecian formas alargadas e irregulares en sus partículas que la componen, pertenecientes a una mezcla de tridimita (SiO_2) y partículas porosas de ceniza como se aprecia en el enfoque a 500x, también se pueden observar los diversos tamaños de las partículas tomando como referencia la escala de 50 μm en la micrografía. Por otro lado, y con un enfoque de 800x se aprecian partículas que corresponden a la tridimita, con apreciables granos de menor tamaño sobre ellas observando tamaños que oscilan entre los 20 μm y 40 μm . La morfología encontrada es asociada al proceso y temperatura de quemado del bagazo, como lo han reportado diversos investigadores. Adicionalmente en la misma figura se muestra la distribución de tamaño de partículas de la CBCA, apreciando la distribución uniforme de tamaños con la que cuenta la CBCA, es decir, la ceniza está compuesta de partículas de tamaños desde 10 μm hasta 200 μm , teniendo un tamaño promedio de 86.62 μm de acuerdo al análisis granulométrico por difracción láser. La adecuada simetría mostrada por los porcentajes entre tamaños refleja la distribución uniforme en la CBCA. La morfología y composición de las partículas coinciden con diversas imágenes obtenidas en investigaciones realizadas por otros autores (Alavez Ramirez, Montes Garcia, Martinez Reyes, Altamirano Juarez, & Gochi Ponce, 2012; Jimenez Quero, Leon Martinez, Montes Garcia, Gaona Tiburcio, & Chacon Nava, 2013).

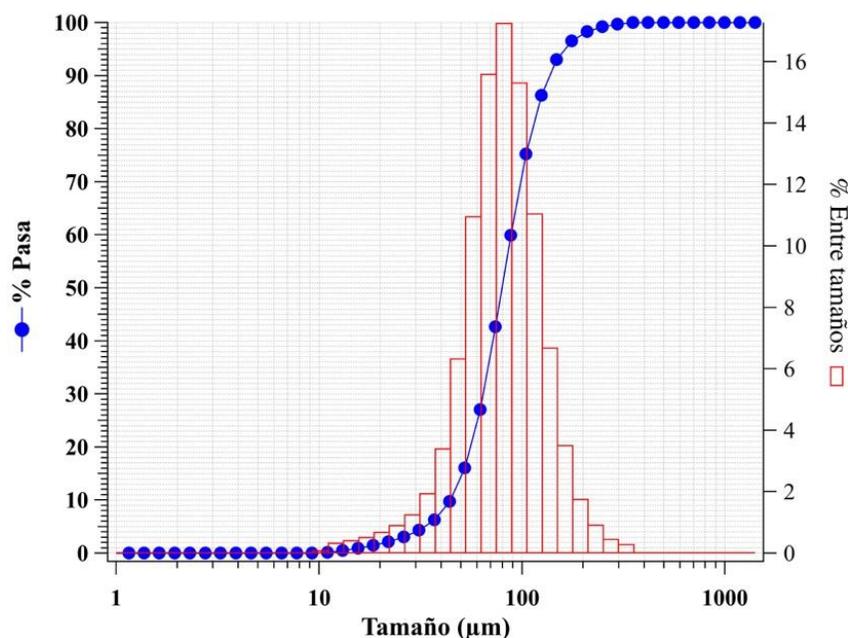
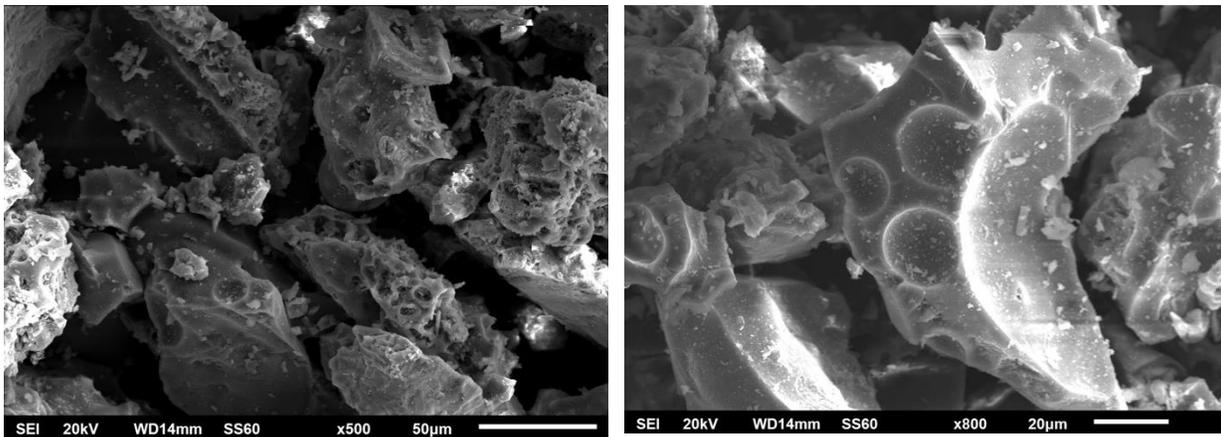


Figura 2 Microfotografías MEB y curvas de distribución de tamaño de partículas de la CBCA.

2.2 Efectos en las características de compactación

En la Figura 3 se observa el efecto en la masa volumétrica seca máxima (MVSM) debido a la adición del CPC y CBCA en 3%, 5% y 7% al suelo en estudio, así también se reporta el efecto por la adición de la combinación CPC-CBCA en esos mismos porcentajes (3%, 5%, 7%) pero en combinaciones de 75% CPC – 25% CBCA y 50% CPC-50% CBCA. Se aprecia que con adiciones de cemento la MVSM no presenta variación significativa, teniendo un valor de -0.84% con una adición de 3% de CPC, de 0.07% con 5% de CPC y sin variación alguna con 7% de adición de CPC, presentando la misma MVSM del suelo sin adición con valor de 1311 kg/m³, estos resultados coinciden con lo indicado en la literatura (imcyc, 2017), en donde se menciona que en suelos estabilizados con cemento portland, salvo casos excepcionales, la MVSM y la humedad óptima de compactación no presentan amplia variación con respecto al suelo sin adición de cemento, siendo esto una característica valiosa en la estabilización de suelos, dado que el efecto del cemento será únicamente el mejorar la durabilidad y la resistencia del suelo. Para el caso del suelo con adición de la combinación 75% CPC-25% CBCA presenta los mayores incrementos en la MVSM, cuando el suelo se le agrego un 3% de dicha combinación CPC-CBCA teniendo el mayor incremento de todas las mezclas de suelo de estudio con un 2.8% llegando a una MVSM de 1348 kg/m³; Para el suelo con un 5% de combinación 75% CPC-25% CBCA presentó un incremento en su MVSM de 1.22% y para el suelo con un 7% de 75% CPC-25% CBCA una MVSM de 1345 kg/m³ lo que representa un incremento de 2.6 %. El incremento en las MVSM puede asociar a tres mecanismos: 1) Una mayor compactación debido a la buena distribución de las partículas y tamaño de la CBCA, 2) Debido a tensión por la succión del agua en los poros, lo que produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares, llamada cohesión aparente (Suarez, 2009) , y 3) A una probable reacción puzolánica de Ca(OH)₂ producto de la hidratación del CPC con los componentes amorfos de la CBCA a edades tempranas debido al cambio en la cinética de reacción generada por la presencia de ceniza (Cordeiro & Kurtis, 2017). Para los suelos con adición de la combinación 50% CPC – 50% CBCA, se presentó que con el 3% de dicha combinación su MVSM tuvo un incremento de 2.6% asociado a una buena compactación debido a las características de la CBCA, cuando el suelo se le adicionó un 5% de la combinación 50% CPC- 50% CBCA su MVSM disminuyó en un 1.6%, y para el suelo con un 7% de dicha combinación se presentó la menor MVSM de todos los suelos en estudio, disminuyendo un 3.66%, esta disminución de MVSM se puede asociar al requerimiento de menor energía de compactación para alcanzar su MVSM, ya que como se ha demostrado en diversos estudios para el caso de las arenas sin contenido de arcillas la permeabilidad es lo suficientemente alta para no desarrollarse presiones de poro en el interior durante el proceso de compactación, y en donde a contenidos de agua bajos se desarrollan fuerzas capilares que dificultan el acomodo de las partículas de suelo obteniéndose una ineficiencia no permanente en la compactación, y que con un incremento en el contenido de agua tales fuerzas desaparecen eficientando el proceso (Rico-Rodriguez & Del Castillo, 2006). De lo anterior se observa ineficiencia en compactación en los contenidos de 50% de CBCA ocasionado por las fuerzas capilares, pero al incrementar el contenido de CBCA a 100% la cantidad de agua requerida por la absorción de la ceniza produce la desaparición de las fuerzas que permiten eficientar la compactación, lo que impactaría en menores costos de construcción de las carreteras como se ha demostrado en recientes investigaciones (Muntohar & Hantoro, 2016). Los suelos con 100% de CBCA también presentaron incrementos en sus MVSM, teniendo valores de 1.3% el suelo con una adición de 3% de CBCA, 0.4% para el suelo con un adición del 5% de CBCA, por último el suelo con una adición de 7% de CBCA presentó una pequeña disminución de 0.6% en su MVSM, este buen desempeño en las MVSM de los suelos con adición solamente de CBCA se asocia a una eficiente compactación y llenado de vacíos debido a la distribución uniforme de partículas de la CBCA, efecto de relleno, el cual se confirma con los resultados de CBR y su análisis correspondiente.

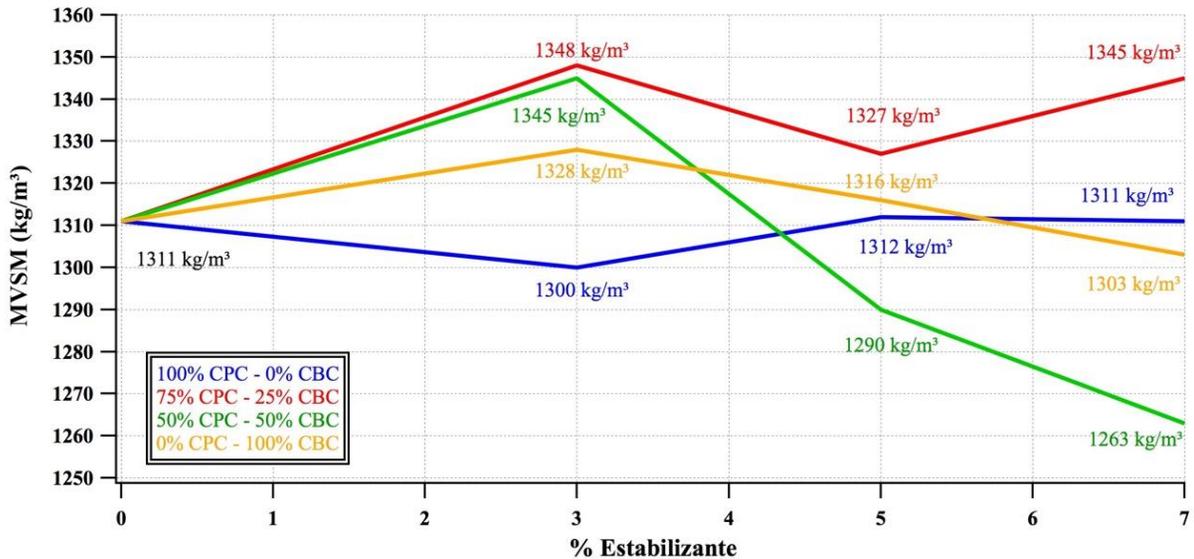


Figura 3 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la densidad seca máxima del suelo en estudio.

Con respecto a las humedades de compactación la Figura 4 muestra la influencia de la adición de CPC y su sustitución por CBCA. En términos generales las humedades en las mezclas que contenían CBCA incrementaron como consecuencia de una mayor absorción de agua por sus partículas, observándose el mayor incremento en la mezcla con 50% de sustitución de CPC de hasta un 2%, lo cual puede asociarse a la reducción de la masa volumétrica seca máxima al contar con la cantidad de agua suficiente para generar las fuerzas capilares entre partículas que impiden su compactación como se observa en la Figura 3. En las mezclas con sustituciones de 25% y 100% el incremento de humedad se encontró dentro del rango de agua que permitió un adecuado proceso de compactación, la variabilidad en los resultados de la humedad óptima es similares a los reportados por otras investigaciones (Onyelowe, 2012)

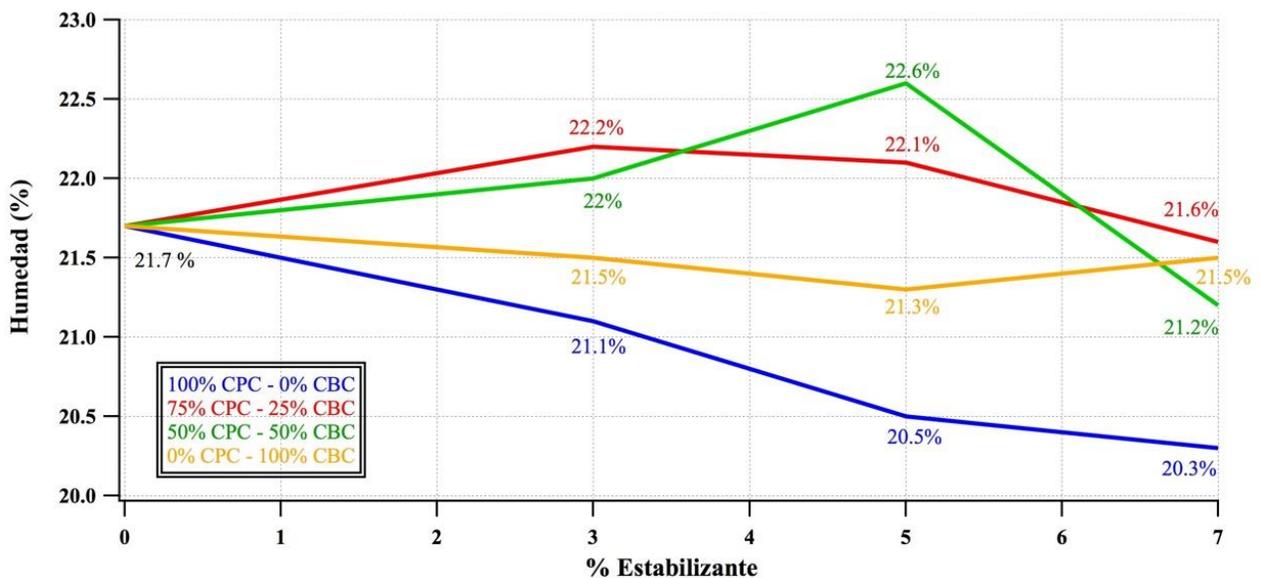


Figura 4 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la humedad óptima de compactación del suelo en estudio

2.3 Efectos en la resistencia a la compresión simple

La Figura 5, presenta el comportamiento de la resistencia a compresión simple del suelo en estudio con adición en tres diferentes porcentajes de CPC, CBCA, combinación 75%CPC-25%CBCA, 50%CPC-50%CBCA, siendo estos porcentajes del 3%, 5% y 7% con respecto al peso del suelo. Se observa que el suelo con adición de CPC presenta un incremento en la resistencia a la compresión simple conforme se incrementa el porcentaje de CPC adicionado, presentando resistencias de 9.89 kg/cm², 12.78 kg/cm² y 30.85 kg/cm², para adiciones de 3%, 5% y 7% respectivamente, siendo el suelo con la adición de 7% de CPC el de mayor resistencia a la compresión, sin embargo el suelo con la adición de la combinación 75%CPC-25%CBCA fue el que presentó un mejor desempeño cuando se adicionó en un 3% y 5%, presentando resistencias a compresión de 10.29 kg/cm² y de 14.25 kg/cm² respectivamente, las cuales fueron mayores a las del suelo con CPC; Para el suelo con adición de 7% de la combinación 75%CPC-25%CBCA presentó una resistencia de 29.19 kg/cm², 1.66 kg/cm² menor a la del suelo con CPC. Para el caso del suelo con adición de la combinación de 50%CPC-50%CBCA presenta con un 3% de dicha mezcla una resistencia de 5.44 kg/cm², para la adición del 5% una resistencia de 13.26 kg/cm² y de 19.69 kg/cm² para una adición de 7%, estos suelos presentan un comportamiento de incremento lineal en resistencia a la compresión conforme se incrementa la adición de 3%, 5% y 7%, como se puede observar en la figura 5, por último los suelos con adición de 100% CBCA, presentaron resistencias a la compresión simple menores de todos los suelos en estudio, con 2.26 kg/cm² cuando se adicionó en un 3% de CBCA, y de 1.5 kg/cm² para un 5% de CBCA, presentando una muy baja resistencia en la adición de 7% de CBCA, observándose una disminución lineal conforme el aumento del contenido de CBCA, lo que indica que al aumentar el contenido de CBCA sin alguna cantidad de cemento la resistencia a la compresión simple decrece. Para los suelos estabilizados mediante cemento portland la resistencia a la compresión es función tanto de la adición de un porcentaje de cemento como de la energía específica que se entrega al suelo por unidad de volumen, observando que si no hay presencia de cemento la resistencia es de un par de unidades por centímetro cuadrado, y que a contenidos mayores de cemento se logran resistencias mayores por la red de productos de hidratación que forma una estructura, pero que la cantidad de cemento puede ser de toneladas debido que esta estructuración es del orden de kilómetros. De lo anterior de acuerdo a los resultados de resistencia que ofrece la combinación de 75%CPC-25%CBCA, se puede reducir hasta un 25% de consumo de cemento obteniendo resistencias similares, eficientando el proceso de compactación como se discutió en el apartado 3.2 al incorporar CBCA, además de aprovechar un residuo agroindustrial cuyo almacenamiento genera un problema de contaminación.

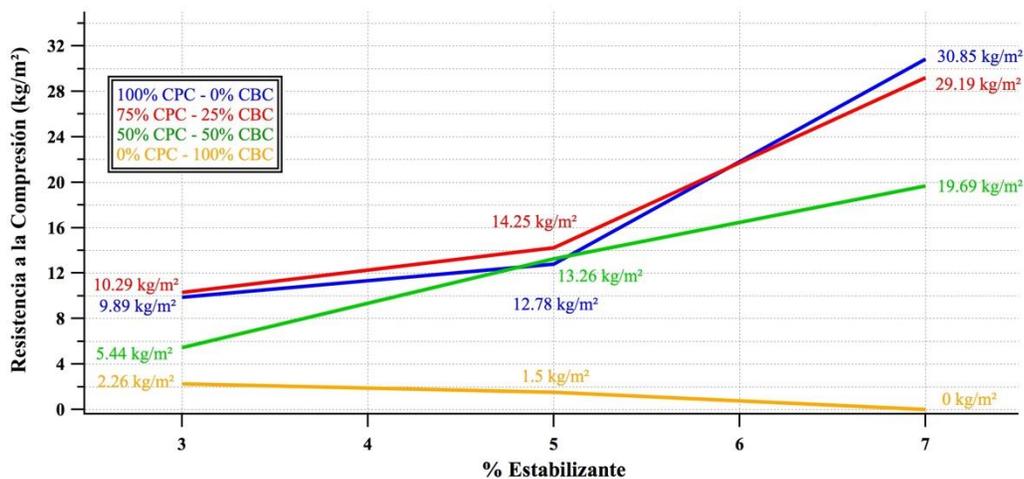


Figura 5 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la resistencia a la compresión simple del suelo en estudio.

2.4 Efectos en el CBR del suelo

La Figura 6 muestra el comportamiento del CBR en las distintas mezclas de suelos ensayados, se observa que las diferentes mezclas presentan un desempeño similar al presentado en el ensayo de resistencia a compresión simple, se tiene que el suelo con adición de CPC al 100% presentó incrementos significativos en los valores de CBR, incrementos de más de tres veces con respecto al suelo sin adición con un valor de CBR de 24.5% como referencia; El suelo con adición de 3% CPC presentó un CBR de 92.50%, para el suelo con 5% de CPC el CBR reportado fue de 110% y al adicionar un 7% de CPC el suelo de estudio alcanzó un CBR de 208%. Por otro lado los suelos con adición en 3%, 5%, y 7% de la combinación de 75% CPC-25% CBCA presentan también un excelente desempeño en el ensayo de CBR, presentando el suelo con 3% de dicha combinación un CBR de 95%, el suelo con la adición de 5% de la combinación 75% CPC-25% CBCA presento un CBR de 107%, estos valores de CBR son muy similares a los reportados por los suelos con adición de 3 y 5% de CPC, el suelo con un 7% de la combinación 75% CPC-25% CBCA tuvo un valor de CBR de 137% quedando por debajo del suelo con CPC en 71% pero por arriba del suelo sin adiciones en un 112.5%. Estos incrementos significativos en el CBR se asocian a la reacción de hidratación agua-cemento y la energía de compactación otorgada al suelo. Para el caso de los suelos con adiciones de la combinación 75% CPC-25% CBCA, el aumento de los valores de CBR se asocia al proceso de hidratación agua-cemento, más la cinética de reacción entre el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la sílica amorfa presente en la CBCA que adopta cambios desde las primeras horas de mezclado como se ha reportado en investigaciones (Cordeiro & Kurtis, 2017), además de un efecto de relleno de las partículas de CBCA que no reaccionaron, comparando estas conjeturas con resultados de diversas investigaciones como la de Basha et. al, que evaluaron la estabilización de un suelo residual con cemento portland y ceniza de cascara de arroz (CCA), encontrando que el máximo aumento en el CBR fue con la adición de 4% de cemento portland (CP) y 5% CCA, y demostrando con los estudios de DRX y MEB un cambio en la estructura del suelo debido a la reacción puzolánica (Basha, Hashim, Mahmud, & Muntohar, 2005) en otro estudio se evaluó la estabilización de un suelo tipo CH (arcilla de alta plasticidad) con adición de CP y CCA, donde demostraron que la adición óptima de CCA fue de 10% con un 6% de CP para obtener los mayores incrementos en los valores de resistencia a compresión simple y CBR.

Para el suelo con combinación de 50% CPC-50% CBCA en un 3% presentó un CBR de 142% asociado este excelente desempeño al desarrollo de reacción de hidratación agua-cemento, una inicial y en menor grado reacción puzolánica y un muy importante aporte como relleno de poros de la CBCA, estos efectos van disminuyendo conforme se va incrementando los porcentajes de adición de la combinación 50% CPC-50% CBCA, lo que generó que el suelo con 5% presentara un CBR de 83%, y el suelo con 7% un CBR de 70%, lo anterior se asocia directamente a la discusión realizada en el apartado 3.2 referente al proceso de compactación que se presenta en la mezcla mencionada

Todos los valores de CBR de los suelos con adición de CPC, CPC-CBCA, en sus dos combinaciones cumplen perfectamente para que el material pueda ser utilizado como material de sub-base en la construcción de carreteras de acuerdo a lo estipulado en el manual de calidad de la secretaría de comunicaciones y transportes en México (SCT) mismo que indica un valor mínimo de CBR de 40%, y para los suelos que presentaron un CBR mayor a 100%, estos cumplen con el valor de CBR solicitado para ser utilizado como material de base, esto significa que los suelos con adición CPC-CBCA podrían ser utilizados en las capas de base y sub-base lo que significaría un ahorro sustancial y aporte ecológica en la construcción y reconstrucción de carreteras (Rico Rodriguez, Orozco y Orozco, Telles Gutierrez, & Perez Garcia, 1990).

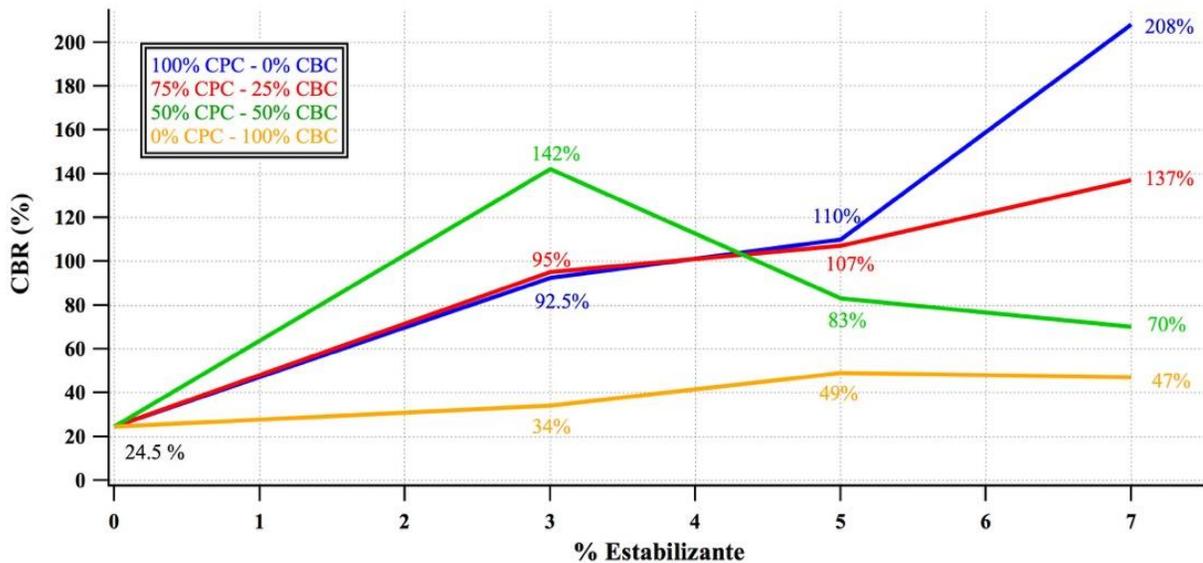


Figura 6. Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre el CBR del suelo en estudio.

Para los suelos con adiciones de CBCA en 3%, 5% y 7% se observa que los valores de CBR incrementaron en todos los casos con respecto a la referencia. De un CBR de 24% sin adiciones a un 34% con 3% de CBCA, 49% con 5% de CBCA y 47% con un 7% de CBCA. Este resultado complementa la discusión del apartado 3.2, que señala a la compactación como parte fundamental de un incremento mecánico en los suelos, y que aunque para este proyecto se tiene un suelo determinado y una sola forma de compactación los resultados varían de un caso a otro por las condiciones en que se conformó la mezcla, y que la CBCA adicionada al suelo o en sustitución de 25% por CPC en el caso específico de la prueba CBR, es una alternativa técnica, ambiental y económica para el conformado de terracerías.

3. CONCLUSIONES

La sustitución parcial de CPC por CBCA en los porcentajes establecidos y de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales empleadas en este estudio, permiten concluir lo siguiente:

- El 25% de sustitución parcial de CPC por CBCA puede ser establecido como porcentaje óptimo en un suelo granular arenoso, ya que presentó un excelente desempeño en los ensayos de compactación, resistencia a la compresión simple y CBR, comportándose muy similar al suelo con adición de cemento portland al 100%, lo que implicaría que es viable el uso de la CBCA como sustituto parcial del cemento para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo para la construcción de capas estructurales en carreteras.
- Las mezclas con sustitución parcial de cincuenta por ciento de CPC por CBCA, también ofrecen un mejoramiento en las propiedades del suelo, destacando principalmente en el ensayo de resistencia a la compresión simple y el ensayo de CBR, en donde los resultados muestran un mejoramiento significativo con respecto al suelo sin adición, logrando valores de CBR que cumplen con la normativa vigente incluso para material de base.
- El uso de CBCA como material único a ser empleado en el mejoramiento de suelos granulares muestra incrementos en la resistencia del suelo en condiciones de confinamiento, como lo es el ensayo de CBR, logrando para el caso de adición de 5 y 7 % valores de CBR que cumplen con la normativa vigente como material de base.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el proyecto de ciencia básica No. 155363. Así mismo se agradece a la empresa ASPHALTPAVE S.A de C.V por su apoyo durante el proyecto.

5. REFERENCIAS

- Alavez Ramirez, R., Montes Garcia, P., Martinez Reyes, J., Altamirano Juarez, D., Gochi Ponce, Y. (2012). *The use of sugar cane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks*. Construction and Building Materials , 296-305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Arenas Piedrahita, J. C., Montes Garcia, P., Mendoza Rangel, J. M., Lopez Calvo, H. Z., Mart, & Martinez Reyes, J. (2016). *Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash* . Construction and building materials , 69-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- ASTM International. (2017). *ASTM C618-17a Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0618-17A>
- ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard specification for portland cement*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17
- ASTM International. (2010). *ASTM D2216-10 Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2216-10>
- ASTM International. (1998). *ASTM D2217-85 Standard practice for wet preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2007) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2011). *ASTM D2487-11 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- ASTM International. (1998). *ASTM D421-85 Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2016) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2017). *ASTM D4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM International. (2012). *ASTM D698-12 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0698-12>
- ASTM International. (2017). *ASTM D1633-17 Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1633-17>
- ASTM International. (2016). *ASTM D1883-16 Standard test method for california bearing ratio (cbr) of laboratory-compacted soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1883-16>
- ASTM International. (2011). *ASTM D558-11 Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0558-11>
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S. (2005). *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*. Construction and building materials , 19 (6) pp: 448-453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Behak, L., Perez Nuñez, W. (2008). *Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cascara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación*. Revista Ingeniería de Construcción, 23 (1), pp: 34-41. <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/BEHAK>

- CONADESUCA. (2017). *4to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México*. Ciudad de México: SAGARPA.
- Cordeiro, G. C., Kurtis, K. E. (2017). *Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity*. *Cement and Concrete Research*, Volume 97, pp: 41-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. M. (2008). *Pozzolan activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 5, pp: 410-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Rego Fairbairn, E. de M. (2009). *Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolan admixture in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 39 (2), pp: 110-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Fairbairn, E. M. (2009). *Effect of calcination temperature on the pozzolan activity of sugar cane bagasse ash*. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 10, pp: 3301-3303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D. (2012). *Soil stabilization using alkaline activation of fly ash self compacting rammed earth construction*. *Construction and building materials*, Volume 36, pp: 727-735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- de Soares, M. M., Garcia, D. C., Figueiredo, R. B., P. Aguilar, M. T., & Cetlin, P. R. (2016). *Comparing the pozzolan behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 71, pp: 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>
- Fernandez Loaiza, C. F. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. D.F: LIMUSA.
- Frias, M., Villar, E., & Savastano, H. (2011). *Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 4, pp: 490-499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). *Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 6, pp: 515-524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Imcyc (2017). *Estabilización de suelos con cemento portland*. Biblioteca digital . (IMCYC, Ed.) Ciudad de México, D.F, México.
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Murugesan, R., Sarayu, K. (2015). *Micro-Analytical studies on sugar cane bagasse ash*. *Sadhana*, Volume 40, Issue 5, pp: 1629–1638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0390-6>
- Jimenez Quero, V. G., Leon Martinez, F. M., Montes Garcia, P., Gaona Tiburcio, C., Chacon Nava, J. G. (2013). *Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars*. *Construction and Building Materials*. Volume 40, pp: 691-701, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Jofre, C., Kraemer, C., Sampedro, A., Lopez Bachiller, A., Atienza, M., Diaz, M., et. al. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: Instituto Español del cemento y sus aplicaciones.
- Joshaghani, A., & Moeini, M. A. (2017). *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. *Construction and building materials*, Volume 152, pp: 818-831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>
- Juarez Gutierrez, O., & Inzunza Ortiz, M. A. (2011). *Guía practica de estabilización y recuperación de pavimentos con cemento portland en México*. Ciudad de México: AMIVTAC.
- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzo, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., Tashima, M. M. (2015). *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolan material in*

- blended portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. Construction and Building Materials, Volume 94, pp: 670-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Morales, E. V., Villar Cociña, E., Frias, M., Santos, S. F., & Savastano, H. J. (2009). *Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation*. Cement & Concrete Composites, Volume 31, Issue 1, pp: 22-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.004>
- Muntohar, A. S., & Hantoro, G. (2016). *Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade*. EJGE , 1-13.
- NMX C414. (2004). *Cementos hidráulicos especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México : ONNCCE.
- Onyelowe, K. C. (2012). *Cement stabilized Akwete Lateritic soil and the use of bagasse ash as admixture*. Science and engineering investigations , 1, 16-20.
- Rico Rodriguez, A., Orozco y Orozco, J., Telles Gutierrez, J. M., Perez Garcia, A. (1990). *Manual de calidad de los materiales en secciones estructurales de pavimentos carreteros*. Sanfandilla.
- Rico-Rodriguez, A., Del Castillo, H. (2006). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y aeropistas (Vol. 1)*. (N. editores, Ed.) Ciudad de México: Limusa.
- Correia, A. A. S., Rasteiro, M. G. (2016). *Nanotechnology applied to chemical soil stabilization*. ProcediaEngineering, Volume 143, pp: 1252-1259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.113>
- Sargent, P., Hughes, P. N., Rouainia, M., Glendinning, S. (2012). *Soil stabilization using sustainable industrial by-product binders and alkali activation*. GeoCongress, 948-957. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412121.098>
- Sing, N. B., Singh, V. D., Rai, S. (2000). *Hydration of bagasse ash-blended portland cement*. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 9, pp: 1485-1488. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00324-0)
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnicos (Vol. 1)*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Torres Rivas, B. J., Gaitan Arevalo, J. R., Espinoza Perez, L. J., Escalante Garcia, J. I. (2014). *Valoración de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento portland* . Nexo Revista Científica, Vol. 27, Núm. 2, pp: 82-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v27i2.1944>

Selección de sistemas constructivos utilizando BIM y método de toma de decisión multicriterio

E. L. Machado^{1*} , N. C. Sotsek¹ , S. Scheer¹ , A. de P. L. Santos¹ 

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.246>

Recepción: 08/08/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El objetivo de este estudio es identificar si el uso de un software de plataforma BIM asociado al método AHP de toma de decisión, puede auxiliar en el proceso decisorio durante la fase de concepción de proyectos. Se analizan tres sistemas constructivos: Albañilería estructural, *Light Steel Framing* y *Light Wood Framing*. El modelado en BIM permitió simulaciones de escenarios y facilitó la extracción de datos, que a su vez ayudaron a los especialistas en la selección del sistema constructivo más adecuado, considerando los criterios establecidos. La originalidad de esta investigación está en considerar varios factores relevantes a la elección del sistema constructivo, y su limitación está en el modelado solamente de las paredes de los sistemas constructivos analizados, y no de la edificación completa.

Palabras clave: sistemas constructivos; modelado de la información de la construcción; BIM; AHP.

Citar como: E. L. Machado, N. C. Sotsek, S. Scheer, A. de P. L. Santos (2018), " *Selección de sistemas constructivos utilizando BIM y método de toma de decisión multicriterio*", Revista ALCONPAT, 8 (2), 209 – 223, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.246>

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

Información Legal

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

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

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

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

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Selection of constructive systems using BIM and multicriteria decision-making method

ABSTRACT

The objective of this study is to identify if the use of a BIM platform software associated to AHP decision-making method can assist in the decision making process during the project design phase. Three construction systems are analyzed: Structural Masonry, *Light Steel Framing* and *Light Wood Framing*. The BIM modeling enabled scenario simulations and facilitated the extraction of data, which, in turn, assisted the specialists in the selection of the most appropriate constructive system, considering the established criteria. The originality of this research is to consider several factors relevant to the choice of the constructive system, and its limitation is in the modeling only of the walls of the analyzed constructive systems, and not of the complete building.

Keywords: constructive systems; building information modeling; BIM; AHP.

Seleção de sistemas construtivos utilizando BIM e método de tomada de decisão multicritério

RESUMO

O objetivo deste estudo é identificar se o uso de um software de plataforma BIM associado ao método AHP de tomada de decisão, pode auxiliar no processo decisório, durante a fase de concepção de projetos. Três sistemas construtivos são analisados: Alvenaria Estrutural, *Light Steel Framing* e *Light Wood Framing*. A modelagem em BIM possibilitou simulações de cenários e facilitou a extração de dados, que, por sua vez, auxiliaram os especialistas na seleção do sistema construtivo mais adequado, considerando os critérios estabelecidos. A originalidade dessa pesquisa está em considerar vários fatores relevantes à escolha do sistema construtivo, e sua limitação está na modelagem somente das paredes dos sistemas construtivos analisados, e não da edificação completa.

Palavras chave: sistemas construtivos; modelagem da informação da construção; BIM; AHP.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los proyectistas del sector de la construcción civil eligen los sistemas constructivos¹ de dos maneras: con base en características conocidas o seleccionando sistemas que fueron utilizados en proyectos anteriores (Jalaei et al., 2015).

En Brasil, según Molina y Calil Júnior (2010), a pesar de los avances tecnológicos alcanzados en ese sector, aún se utiliza el mismo sistema constructivo desde la época de la colonización del país, es decir el sistema de albañilería, esencialmente artesanal, basado en la colocación de bloques.

Se conoce que esta práctica de la construcción civil es favorecida en detrimento de sistemas constructivos alternativos. Eso ocurre por causa de las normas y las instituciones preestablecidas, de las inversiones en infraestructura ya existentes, del conocimiento técnico consolidado y también, debido al gran número de agentes (propietarios, proyectistas, constructores y proveedores) de la cadena de suplidores del sector que siempre actuaron con estos insumos y técnicas (Mahapatra et al., 2012).

¹ En esta pesquisa, los autores consideran el sistema constructivo como servicio (mano de obra, material y equipamientos) necesarios para la ejecución de paredes modeladas en el proyecto arquitectónico.

Entre tanto, para Jadid y Badrah (2012), una elevada demanda por materiales viene surgiendo en función de la expansión del sector de construcción civil en todo el mundo. Luego se observó la necesidad emergente por la búsqueda de nuevos insumos.

Según Mahapatra et al., (2012) muchos países buscan alternativas más eficientes para mantener sus protocolos de sustentabilidad ambiental. En Finlandia, por ejemplo, presentó planes para que toda la construcción en el país, a partir de 2017, pase a usar recursos e insumos que atiendan a la meta de eficiencia energética estipulada en 2010. Según los autores, en Reino Unido, un "código para casas sustentables" se ha establecido para las normas para las nuevas construcciones desde 2008.

En Brasil el principal sistema constructivo utilizado en la construcción de edificaciones es albañilería. Entre tanto, no se pueden ignorar los impactos ambientales generados con su uso, principalmente debido a la cantidad de residuos generados en conteos de obra. Los problemas no se restringen apenas a la cuestión ambiental, pero también en lo que respecta a la baja productividad y la calidad de los emprendimientos, al ser comparados con otros países que poseen como base sistemas constructivos industrializados, que se caracterizan por la alta productividad y control del proceso (Molina y Calil Júnior, 2010; Mello, 2007).

Por consiguiente, queda evidente que es imprescindible identificar otros sistemas constructivos que puedan ser más adecuados para la operación del día a día del escenario brasileño. Sistemas que presenten menor impacto ambiental y que pueda facilitar el mantenimiento futuro de las edificaciones.

Basados en esa problemática el software de plataforma Building Information Modeling (BIM) puede ser utilizado como recurso durante la concepción de los proyectos arquitectónicos.

El BIM, según Succar (2008, p.5) “es un conjunto de tecnologías, procesos y políticas que permiten que varias partes interesadas puedan proyectar, construir y operar una instalación de forma de colaboración”. En el modelo de BIM los componentes, insumos y materiales pueden ser insertados permitiendo la creación de una base de datos accesible, que funciona como soporte para el proceso de selección de insumos y componentes para un emprendimiento (Jalaei y Jrade, 2014).

De esa forma, este artículo tiene como objetivo identificar se la integración de BIM en proyectos arquitectónicos puede ayudar para la toma de decisión, durante la fase de concepción del proyecto, a fin de optimizar la selección de componentes para una construcción. Para alcanzar tal objetivo el artículo utiliza como base el *software* Revit® (versión 2015) de Autodesk para BIM, y el método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), de toma de decisión. En el enfoque inspirado en Marcos (2015), la propuesta innovadora presente en este artículo está en la integración de BIM con AHP y el uso de no apenas un criterio de selección del sistema constructivo sino de varios criterios considerados relevantes y destacados por la literatura.

La pesquisa analiza tres sistemas constructivos: Albañilería Estructural, *Light Steel Framing* (LSF) y *Light Wood Framing* (LWF). Las opciones constructivas, más específicamente, las paredes de cada sistema son analizadas y comparadas y sus alternativas son evaluadas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas constructivos

El aumento de la competitividad entre las empresas de construcción civil es creciente en todo Brasil. Esa concurrencia exige estrategias empresariales que permitan un aprovechamiento mayor de los recursos y de la racionalización de los procesos (Milan, 2011). En este contexto, Marcos y Yoskhioka, (2015) apuntan que una alternativa posible para la racionalización e industrialización de los procesos de construcción civil y el uso de nuevas tecnologías constructivas.

Los motivos que justifican el uso de la albañilería en el país forman referencia a: la mano de obra no calificada², económica y disponible en todo el país; la familiaridad con la materia prima, que son los bloques cerámicos o de hormigón, que es de fácil acceso y es usada en diversas obras finalmente al aspecto cultural, los brasileños valorizan la construcción en albañilería, pues garantiza el confort tanto en invierno como en verano (Ferreira, 2014).

Sin embargo, se aprecia que este proceso constructivo a base de albañilería estructural es esencialmente artesanal, siendo marchantes aspectos como la baja productividad y el elevado desperdicio de recursos materiales (Santiago y Araújo, 2008). Mello (2007) destaca que este sistema constructivo proporciona calidad y productividad insatisfactoria, poco ha hecho modificaciones, usa mano de obra de baja calificación y por consecuencia genera alta rotatividad. Además de las características antes mencionadas, estudios sectoriales del Servicio Brasileño de Apoyo a las Micro y Pequeñas Empresas SEBRAE (2008) apuntan que existe una pequeña participación del empleo formal en la parcela total de ocupados en el sector de construcción lo que favorece la alta rotatividad de la mano de obra.

Basado en esta realidad es que el sector de la construcción civil en Brasil viene buscando alternativas de sistemas constructivos más eficaces y de menor impacto ambiental. Los sistemas constructivos prefabricados, como *Light Steel Framing* (LSF) y *Light Wood Framing* (LWF) representan una alternativa a los sistemas tradicionales, visto que el control de la planificación y del proyecto dentro de la industria contribuye para el combate al desperdicio de materiales y la lentitud del proceso de producción (Vivan, 2011).

Según Ferreira (2014) varias son las ventajas que la industrialización del sector de construcción civil promueve. Entre las que se destacan la mayor rapidez en la terminación de la obra, la eliminación de costos indirectos de difícil contabilización, mayor calidad del producto final, sustitución de parte de la mano de obra por equipamientos, trazabilidad de procesos, sitios de obras más limpo y organizado.

El sistema LWF este compuesto por componentes estructurales de madera, revestidos por paneles del tipo: lámina OSB, y cementícea que funcionan como elementos de rigidizador y lámina de yeso. El LWF consiste en un sistema constructivo industrializado de rápida ejecución. Según Molina y Calil júnior (2010), Cardoso (2015) y Kobunbun 2014 el ambiente industrial permite que varias actividades sean ejecutadas simultáneamente teniendo como consecuencia la reducción de plazos de entrega y costos.

Otra ventaja presentada en los trabajos con relación al sistema LWF es la materia prima ser renovable. Todavía no toda la madera puede ser utilizada para este procesamiento. Según la DATEC 020-A (2015) la madera usada para LWF debe ser tratada de forma adecuada. Y la misma debe presentar buena calidad (sin defectos) y con dimensiones considerables para ser industrializada en la concepción de paneles estructurales.

Según datos del Sistema Nacional de Informaciones Forestales (SNIF, 2017) la madera serrada, aquella que es utilizada para la construcción, viene creciendo en los últimos años, siendo que de 2013 a 2014 el crecimiento fue de 48%.

Por ser considerado un método constructivo nuevo en Brasil pocos son los proveedores y fabricantes de productos específicos como la placa cementícea, el manto hidrófugo, etc., lo que agrega costo a la edificación (Cardoso, 2015). Otro factor que destaca es lo relacionado a la mano de obra calificada. Kokubun (2014) destaca que es esencial para este tipo de sistema constructivo mano de obra calificada para las operaciones de fabricación de paneles y de montaje y desmontaje de la estructura. Esta mano de obra a su vez se hace menos disponible, vista la necesidad de capacitar estos funcionarios y traer los profesionales del sector maderero.

² En este trabajo fué adoptado como mano de obra no calificada “aquella cuyo grado de instrucción queda restringido al nivel medio incompleto, eso es porque en la categoría de nivel medio son incluidos cursos técnicos profesionales que pueden calificar, aun cuando de forma limitada, los profesionales para el mercado de construcción civil” (Fochezatto; Ghinis, 2011, p. 654).

Además de estos aspectos que deben ser considerados, el sistema sufre con barreras culturales. La madera aún es considerada un material de baja calidad y muchos tienen recelo de que implique tala, afirma Cardoso (2015). Para Días (2005), el principal problema relacionado con la barrera cultural es la falta de conocimiento y desarrollo tecnológico en el área.

El sistema LSF presenta características semejantes al LWF. La principal diferencia está en el uso de la materia prima, que en este caso es el acero y no la madera. Las piezas del *Light Steel Framing* son galvanizadas, formadas al frío, proyectadas para soportar las cargas de la edificación y trabajar en conjunto con otros subsistemas industrializados (Sousa y Martins, 2009).

Por ser un sistema industrializado, necesita, así como el LWF de mano de obra más calificada. (Ferreira, 2014).

El LSF es un sistema constructivo más caro en términos de materia prima: el acero galvanizado (Ferreira, 2014). Por tanto, los costos directos e indirectos pueden ser menores, si se comparan a los plazos reducidos durante la construcción y la inexistencia de pérdidas comunes en construcciones convencionales.

Según Gomes et al. (2013), este sistema presenta una reducción temporal de 1/3 en plazos de construcción cuando es comparado con el método convencional de construcción en albañilería. Siendo así, el sistema es más usado cuando el factor tiempo de construcción es más importante que los costos.

Cabe destacar que la elección de los sistemas constructivos debe tomar en consideración aspectos ambientales, económicos, sociales. Según Jadid e Badrah (2012), la elección de un insumo es como consecuencia del sistema constructivo y está relacionado a varios criterios que incluyen, pero no la limitan a:

- Durabilidad, con bajos requisitos de mantenimiento;
- Producido con recursos naturales y renovables;
- Accesible y disponible a partir de fabricantes locales;
- No afecten la calidad del aire interior y ser ambientalmente amigables;
- No contener componentes tóxicos;
- Adaptables para la redistribución de los espacios internos para atender a un servicio específico;
- Costos financieros.

Esas informaciones deben estar disponibles para la selección del sistema constructivo más adecuado a aquella situación. Por tanto, es imprescindible la elaboración de una base de datos, en la cual estas informaciones estén disponibles durante la fase de concepción del proyecto. Esta puede ser creada en alianza con los proveedores y proyectistas que ya actúan en el área en que puedan informar con relación a los aspectos listados anteriormente (Jadid y Badrah, 2012).

2.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

El *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desarrollado por Saaty (1990), es basado en tres principios fundamentales: la descomposición de la estructura, la comparación de los juicios y composición jerárquica de prioridades. La descomposición del problema de decisión facilita la construcción de jerarquías de criterios para determinar la importancia de cada uno. Tales criterios, definidos por especialistas, son analizados y comparados, de dos en dos de modo independiente. Para esto pueden ser considerados ciertos hormigones de las alternativas o juicios subjetivos.

Una vez estructurada la jerarquía las alternativas son evaluadas sistemáticamente, por medio de la comparación, dos a dos, según cada uno de los criterios y una escala numérica es atribuida a cada par de n alternativas por los especialistas (Tabla 1). Estas escalas numéricas son utilizadas en las comparaciones de pares entre las alternativas de acuerdo con su impacto sobre un elemento colocado en un nivel superior de la jerarquía (Saaty, 1990).

Tabla 1. Escala de clasificación de Saaty.

Intensidad de importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia débil de uno en detrimento de otro
5	Esencial o fuerte importancia
7	Demostró importancia
9	Importancia absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes

Fuente: Adaptado de Saaty (1990).

La secuencia de cálculos del método puede ser encontrada detalladamente en Saaty (1990). Este método permite aún chequear el *ranking* obtenido por medio del cálculo del índice de consistencia. Entre las ventajas del AHP se destacan la facilidad de uso y la facilidad de ajuste de su estructura jerárquica para lidiar con problemas de diferentes tamaños (Velasquez e Hester, 2013).

2.3 Building Information Modelling (BIM)

Según Eastman et al. (2014), el BIM es una tecnología de modelaje y un conjunto asociado de procesos para producir, comunicar y analizar modelos de construcción, incluyendo informaciones relacionadas a la concepción, simulación y operacionalización a través del uso de diferentes herramientas integradas.

Durante la concepción del proyecto, el BIM puede apoyar el detalle del proyecto, trayendo informaciones específicas en cuanto a la estructura del emprendimiento, los procesos de ejecución e inclusive en la elección del sistema constructivo más adecuado al proyecto (Jalaei y Jade, 2014). Según Jalaei et al. (2015), la gran ventaja de usar el BIM para selección de sistemas constructivos es su función de integración y la interoperabilidad de informaciones. Su capacidad de incluir descripciones detalladas de un único edificio o conjunto de edificios puede ser importante para hacer el análisis preciso en cuanto al emprendimiento.

Aún en Brasil varios trabajos han estudiado la integración del BIM la sustentabilidad ambiental. El trabajo de Oliveira et al. (2015), por ejemplo, destaca el BIM como recurso que permite el enfoque de todo el ciclo de vida (ACV) de la edificación, permitiendo el análisis durante la concepción del proyecto; Marino (2014) plantea al BIM como herramienta para auxiliar y optimizar, por ejemplo, uso de energía, agua y materiales en análisis integrados. Carvalho y Scheer (2015) demuestran la característica del BIM en la anticipación de problemas e ineficiencia de proyecto. Para ellos, errores muchas veces percibidos apenas en obras pueden generar la reducción de los costos de la construcción y en el consumo de materiales, proporcionando ganancias de la calidad de las obras y economía de recursos, favoreciendo la sustentabilidad de las edificaciones.

2.4 Trabajos relacionados

Para conocer mejor el problema práctico y examinar el potencial del tema en estudio, una pesquisa fue realizada para identificar trabajos recientes y relacionados publicados en los últimos cinco años. Se realizó la búsqueda en las bases referenciales - ScienceDirect y Portal de Periódicos del CAPES. Fueron identificados diversos trabajos relacionados al tema. Los trabajos que más se aproximaron al análisis de sistemas constructivos utilizando BIM y/o la herramienta de apoyo para la toma de decisión fueron los cuatro descritos a continuación.

El trabajo de Marcos y Yoshioka (2015) utilizó el BIM como herramienta para auxiliar los gestores en la elección de insumos que proporcionen el menor impacto ambiental, comparando dos sistemas constructivos: albañilería y light steel frame. Su enfoque fue específico para el impacto ambiental.

La pesquisa de Jadid y Badrah (2012) creó un método de toma de decisión para la selección de materias durante la fase de concepción de un proyecto arquitectónico. Trajo el enfoque en el método multicriterio dentro de los proyectos arquitectónicos.

El trabajo Jalaei et al. (2015) buscó unir los dos temas, el software de plataforma BIM (Revit) y el método de toma de decisión. Los autores crearon un plug-in dentro del BIM para auxiliar en la elección de insumos que proporcionaran un menor impacto ambiental, analizando más específicamente, el ciclo de vida de los materiales. Nuevamente, el enfoque del trabajo fue el aspecto ambiental.

Para Jobim et al. (2006) la selección de sistemas constructivos no se caracteriza apenas por el acto técnico o profesional, más debe tomar en consideración el contexto en que el emprendimiento está insertado, las exigencias de los usuarios, los recursos disponibles, por las condiciones físicas, ambientales, y los aspectos relativos a la adecuación de costos.

La novedad de este trabajo está en la propuesta de buscar analizar no solo un factor relevante para la elección del sistema constructivo, pero también algunos de los principales factores, tales como el aspecto ambiental relacionado a los insumos, el costo financiero y factores operacionales, como disponibilidad de mano de obra y materiales.

De esta forma, este tema además de relevante e investigado por otros autores es fundamental, pues viabiliza desdoblamiento de los nuevos sistemas constructivos y ayuda a ampliar la incorporación de BIM en la cadena productiva de la construcción civil en Brasil.

3. MÉTODO

El objetivo de este estudio es identificar si el uso de una herramienta BIM asociada con un método de toma de decisión multicriterio puede auxiliar en la decisión. –se considera que esa integración podrá generar un instrumento para auxiliar en la elección más adecuada del sistema constructivo, según los requisitos de usuario, con base no solo en un criterio relevante, más bien buscando tratar los factores ambientales, económicos y operacionales de los sistemas.

La propuesta del artículo está basada en el concepto de *design science* que, según Dresch, Lacerda y Antunes Júnior (2015, p.57) “es la ciencia que procura consolidar conocimiento sobre el proyecto y desarrollo de soluciones para mejorar sistemas, existentes, resolver problemas o, aún, crear nuevos aspectos que contribuyan para una mejor actuación humana sea en la sociedad, o en las organizaciones”.

Así para el desarrollo de esta pesquisa se usó el método de Lukka (2003), que divide el estudio en siete principales etapas: (1) Identificar un problema práctico y relevante; (2) Examinar el potencial de pesquisa en conjunto con el objetivo; (3) Obtener conocimiento teórico y práctico del área; (4) Proponer una solución innovadora y desarrollar una construcción que solucione el problema identificado; (5) Implementar y probar la solución a través de un caso; (6) Evaluar la aplicabilidad de la solución; e (7) Identificar y analizar las contribuciones teóricas.

Las etapas 1 a 4 fueron presentadas en la primera parte de este artículo. Seguidamente será descrita como las etapas 5 a 7 fueron desarrolladas.

En la etapa “implementar y probar la solución” se buscó a través de un estudio de caso presentar el uso de un software de plataforma BIM con el método AHP. El software de plataforma BIM seleccionado para el estudio fue el *software* Revit® de Autodesk (versión 2015) que según Suermann (2009) es el *software* más utilizado en todo el mundo (67,08%).

El método AHP, permite estructurar formalmente los problemas, presenta simplicidad de comparación entre pares de ellos y permite también chequear la consistencia de los pesos atribuidos (Leite y Freitas, 2012).

Para la aplicación del método AHP, fueron invitados especialistas de la Universidad Federal de Paraná (UFPR) y del sector privado, actuantes directos con los sistemas constructivos, que contribuirán a través de su *expertise* y experiencia en el caso. La muestra adoptada es no

probabilística por conveniencia, es decir fueron seleccionados especialistas en que los investigadores tenían contacto previo y que los mismos tenían interés en participar de la pesquisa. Los especialistas son:

- A y D - investigadores UFPR;
- B, C y E - representantes del medio corporativo que actúan directamente con los tres sistemas constructivos en estado de Paraná.

Los especialistas consultados evaluaron los sistemas constructivos a través de formularios concebidos según la estructura del método AHP. Para colaborar con esta parte de la pesquisa fué utilizado el cuestionario elaborado con uso de *GoogleForms* (Disponible en el link: <https://goo.gl/forms/GWo7viiJft30i1LG2>).

Para atribuir peso a cada criterio establecido, los especialistas utilizaron su experiencia profesional y también de un documento elaborado, con las informaciones encontradas en la literatura referida a cada sistema constructivo utilizado en Brasil. Estas informaciones fueron presentadas en la revisión bibliográfica de este artículo.

Para hacer la ponderación de los criterios y el *ranking* de las alternativas, fue utilizado como base el *software SuperDecisions* (de la Creative Decisions Foundation, versión 2.0.6).

Para la implantación del estudio de caso fue seleccionado un proyecto arquitectónico. Entre los proyectos identificados una vivienda de interés social de 42m² fue la seleccionada. Esa fue modelada en el *software*® Revit tres veces. Una primera vez usando como base la construcción de albañilería estructural, la segunda usando paredes en *Light Steel Framing* y la tercera con paredes en *Light Wood Framing*.

En cada uno de los proyectos fueron incorporadas informaciones con el objetivo de crear una base de datos dentro del sistema. Estas informaciones, presentadas en la Tabla 2, fueron tomadas en diferentes fuentes de datos y fueron basadas en criterios presentados por Jadid y Badrah (2012).

Tabla 2. Fuente de Informaciones para la elaboración de la base de datos del software Revit

Información	Fuente de extracción
Energía incorporada por cada material CO ₂	Literatura (Caparelli, Crippa e Boieng, 2016) e baseado em dados extraídos do <i>Software Simapro</i>
Tiempo de producción	Literatura (Cardoso,2015; Molina e Calil Júnior, 2010; Ferreira 2015)/medio corporativo
Costo de fabricación	SINAPI/PR* nov. de 2016/literatura (Cardoso, 2015) e medio corporativo
Disponibilidad de mano de obra	Literatura (Ferreira, 2015 e Kokubun 2014)/ medio corporativo
Disponibilidad de materia-prima (proveedores)	Literatura (Ferreira, 2015)/ medio corporativo

* Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices de la Construcción Civil (SINAPI), estado de Paraná.

Para la delimitación de la pesquisa, el comparativo de los sistemas hace referencia apenas al área de pared con revestimiento, no consideran la fundación, marcos, instalaciones eléctricas e hidráulicas ni tejado.

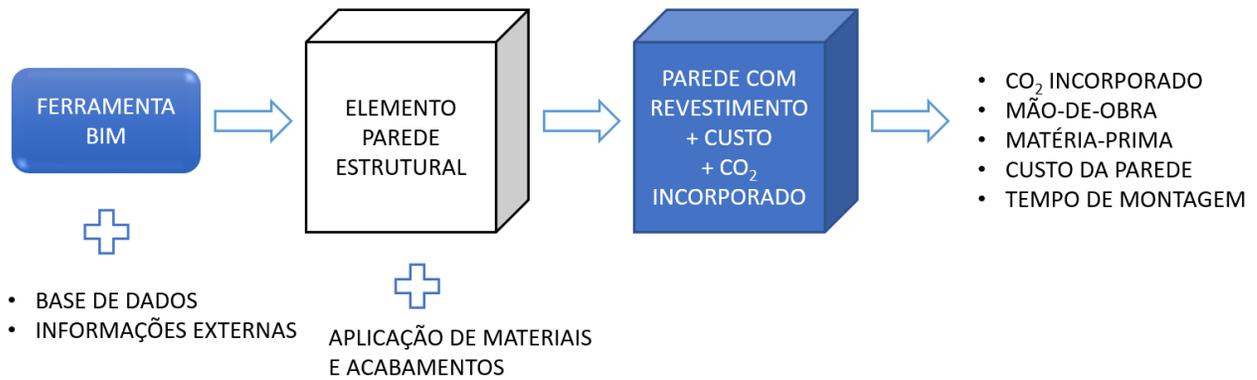


Figura 1. Esquema del proceso de información de Revit. Adaptado de Marcos y Yoshioka (2015).

Esas informaciones fueron insertadas de forma manual dentro del software Revit que permite almacenar datos específicos para cada componente. Según Marcos y Yoshioka (2015), la gran ventaja de utilizar una herramienta unificada como Revit es que una vez que se utiliza una base de datos unificada para todo el contenido de información, las modificaciones en un determinado documento (por ejemplo, una planta baja del proyecto arquitectónico), se propagan para los demás documentos relacionados automáticamente, garantizando así la agilidad de las actualizaciones, modificaciones y confiabilidad en el acceso a las informaciones.

En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso de información del Revit. Primeramente, el elemento (en ese caso, pared) es dibujado, seguidamente se aplican los materiales y acabados relativos a esa pared y finalmente las informaciones relativas al sistema constructivo como un todo. En este caso, el valor de CO₂ incorporado de cada pared, el costo de cada materia prima, el tiempo de ejecución y la especificación de la mano de obra.

En la etapa siguiente, evaluación de la aplicabilidad, los especialistas fueron consultados en cuanto a la relevancia del software de plataforma BIM para apoyo de la decisión durante la concepción del proyecto arquitectónico.

Finalmente, en la etapa de “identificación y análisis de las contribuciones teóricas” se buscó reflexionar sobre la contribución alcanzada en comparación a estudios recientes similares.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

4.1 Implementar y probar la solución

La vivienda de interés social seleccionada posee 42 m², siendo conformada de dos cuartos, sala cocina y un baño. También fueron considerados que el escenario habitacional sería la región de Curitiba, en el estado de Paraná.

Utilizando el software Revit, fue modelada la residencia en los tres sistemas constructivos (albañilería estructural, LSF y LWF). Los sistemas LSF y LWF fueron modelados a partir de los *plug-ins Timber Framing* (de Autodesk) y *Metal Framing Wall+* de AGACAD (versión 1.0.0.6), respectivamente. El modelaje con uso de los *plug-ins* es rápida, lo que permite al proyectista modelar apenas una vez el emprendimiento. Os *plug-ins* utilizados permiten la conversión de cualquier tipo de pared en una pared de LSF o LWF casi instantáneamente, lo que aumenta la productividad del proceso de modelaje. Los *plug-ins* permiten alteraciones en el nuevo *frame*, de acuerdo con las preferencias del proyectista, una vez que pueden ser alterados los tipos de perfiles bien como sus dimensiones, las distancias entre los montantes y los detalles de las aberturas y conexiones.

A los parámetros de las paredes modeladas fueron adicionados los datos destacados de la Tabla 2.

Seguidamente, utilizando el recurso de documentación del Revit, que se trata de una de las ventajas de softwares BIM, se obtuvo automáticamente la lista de materiales como los valores, para las paredes de los tres sistemas constructivos (Tabla 3).

Tabla 3. Comparativos entre los tres sistemas constructivos

	Albañilería estructural	LSF	LWF
CO₂ incorporado /m² de pared (kg)	50,3	159	36,9
Costo/m² de pared (R\$)	247,63	295,99	182,32
Total de CO₂ incorporado (kg)	4.842,88	15.308,46	3.552,72
Costo total (R\$)	23.841,82	28.498,08	17.553,77
Tiempo de ejecución	12 días	1/2 día	1/2 día
Mano de obra calificada	nao	sim	sim

En la próxima etapa se usó el método AHP para auxiliar en la estructuración del problema de selección del sistema constructivo. De esta forma, primeramente, los criterios fueron identificados en la literatura (Figura 2).

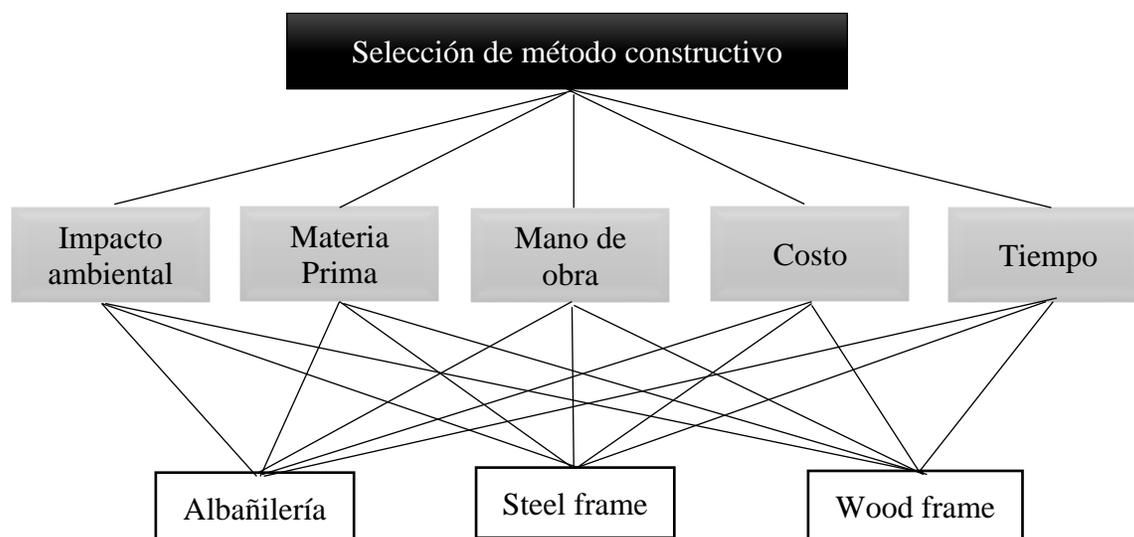


Figura 2. Jerarquía de criterios y alternativas de estudio de caso, para uso del método AHP

Luego a partir de la estructura jerárquica de este estudio de caso y de los datos obtenidos a través del Revit, los especialistas consultados evaluaron los sistemas constructivos, siguiendo la estructura del método AHP, utilizando la escala presentada en la Tabla 1. Las evaluaciones de los especialistas fueron implementadas en el *software Super Decisions*. Así, los pesos estipulados, por los especialistas, para cada criterio pueden ser visualizados en la Tabla 4.

Se observa según la Tabla 4 que los pesos indicados por los especialistas, para cada criterio de selección del sistema constructivo, fueron bien discrepantes, es decir no hubo consenso entre ellos. Para los especialistas A y B, por ejemplo, el peso de mayor elección fue el impacto ambiental. En cuanto para los especialistas C, D y E, el criterio más impactante es el valor financiero de la obra.

Tabla 4. Pesos estipulados por los especialistas para cada criterio analizado (en porcentaje)

Criterios	Especialista				
	A	B	C	D	E
Impacto Ambiental	54,67	53,66	12,56	9,68	3,11
Disponibilidad de materia prima	23,73	23,63	20,52	17,03	5,45
Disponibilidad de mano de obra	2,91	13,61	11,81	17,24	11,31
Costo	7	5,66	37,32	42,5	52,49
Tiempo	11,69	3,44	17,79	13,55	27,64

Ese análisis comprueba de hecho que la elección del sistema constructivo depende de los intereses de cada usuario/constructor. Según Jobim et al. (2006), el análisis de las alternativas de sistemas constructivos y materiales disponibles, independientemente de la tecnología ser considerada innovadora, debe ser analizada sobre distintos criterios y en especial atender a determinados requisitos de desempeño, tales como resalta la norma de desempeño 15.575 (ABNT, 2013).

A partir de los pesos estipulados para cada criterio fue posible, aún con ayuda del *software SuperDecisions*, identificar cual sistema constructivo es el más adecuado para cada especialista. El porcentaje de preferencia por el sistema constructivo (*ranking*) es presentada en la Tabla 4.

Se percibe por la Tabla 5 que el sistema constructivo más adecuado en la evaluación de los especialistas es el *Light Wood Framing*.

Los especialistas fueron consultados para analizar la integración del BIM con el método MCDM. Como los mismos también conocen los sistemas constructivos, porque actúan en el ramo de construcción civil, también contribuirán para crear el ranking de preferencia de los sistemas constructivos.

Esa opción fue la más prometedora principalmente por las ventajas que el sistema presenta al ser comparado con albañilería estructural en los aspectos de: tiempo, costo e impacto ambiental y con relación al sistema *Light Steel Framing*, en: costo, materia-prima e impacto ambiental.

Vale resaltar que el escenario elaborado tomo en cuenta la construcción de esta casa en la región de Curitiba en el estado de Paraná, donde son identificadas empresas que fabrican con los tres sistemas constructivos. Y que la propuesta de este artículo es mostrar los escenarios establecidos y no cual sistema es el más adecuado, visto que, considerando otras ponderaciones, un sistema puede ser más prometedor en algunas situaciones y no tanto en otras.

Tabla 5. Porcentaje de preferencia de los sistemas obtenido por el método AHP

Sistemas Constructivos	Especialistas				
	A	B	C	D	E
Albañilería	12,1	35,37	8,27	4,63	52,14
LSF	17,95	14,16	17,91	18,51	24,67
LWF	69,95	50,47	73,82	76,86	23,19

4.2 Evaluar la aplicabilidad da solución

Con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de la solución propuesta los especialistas fueron cuestionados en cuanto a la relevancia de las informaciones retiradas del software Revit para elección del sistema constructivo más adecuado. En una escala de 1 a 5 donde 1 significa nada relevante y 5 muy relevante, la nota promedio de los especialistas fue 3.2, es decir de modo general, ellos coincidieron que el uso de un *software* de plataforma BIM contribuye para la elección del sistema constructivo.

Ellos también describieron como consideran que el BIM puede contribuir para uso del nuevo sistema constructivo, inclusive para combatir algunas barreras sociales.

El especialista A consideró que a partir del momento que el profesional tiene conocimiento de la herramienta BIM ella puede ser imprescindible para auxiliar en su trabajo. Entre tanta alerta que el uso incorrecto ó equivocado de la herramienta, puede representar apenas una visualización, de la misma forma, equivocada del estado real de un emprendimiento.

El especialista B relata ser extremadamente satisfactorio el uso del software de plataforma BIM durante la fase de concepción y destacó que eso puede contribuir para auxiliar los usuarios elegir construcciones más sustentables.

El especialista C en común acuerdo con el especialista B considera la herramienta satisfactoria para el proceso comparativo, desde que las fuentes extraídas sean confiables. El especialista D destacó aún que el BIM garantiza que el mismo proyecto sea editado, modificando los sistemas constructivos de forma fácil y simple para enseguida hacer el comparativo para la opción más adecuada.

El especialista es también entiende que el BIM permite mayor detallado de un proyecto lo que hace los procesos más precisos y con menos desperdicios de materia-prima y mano de obra.

4.3 Identificar y analizar las contribuciones teóricas

Basados en el estudio de caso realizado y en la evaluación hecha con los especialistas se cree que el uso del BIM, como en el caso el Revit y el método AHP contribuyeron de forma efectiva para colaborar en la elección del método constructivo, una vez que a través de esta integración fue posible comparar los criterios y visualizar a partir del modelaje BIM, el proyecto en 3D, como también extraer fácilmente los cuantitativos.

Se considera además que el comparativo es el camino para que más usuarios puedan conocer otros sistemas constructivos e implanten los mismos en sus construcciones.

Como el BIM incorpora una biblioteca para almacenamiento de informaciones, este beneficio puede ser utilizado por los gestores durante el proceso de concepción de proyectos, contribuyendo en elección del sistema constructivo más adecuado. Además de eso, las informaciones adicionales pueden ser actualizadas dependiendo del emprendimiento por los propios proveedores de insumos y constructores. Por ejemplo, los insumos del LWF aún pasan por ensayos físicos y otros insumos están siendo desarrollados. En esta situación el propio proveedor del insumo podría facilitar esas informaciones a los escritorios de proyectos para mostrar las nuevas informaciones e insumos con el objetivo de actualizar los datos y presentar las novedades con relación a aquel sistema constructivo. Otra ventaja es la practicidad de la herramienta en modelar varios sistemas constructivos diferentes de manera fácil y rápida, siendo este uno de los recursos para auxiliar en la elección que, asociado a la obtención automática de la documentación del proyecto, puede hacer la concepción de proyectos una etapa más rápida/eficiente.

5. CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo propuso el uso del software de plataforma BIM asociado al método AHP para ayudar en la elección del sistema constructivo más adecuado durante la fase de concepción de proyectos arquitectónicos. El enfoque dado por la investigación tomo en consideración el análisis de tres sistemas constructivos: Albañilería estructural, *Light Steel Framing* y *Light Wood Framing*. el proceso de elección del sistema constructivo considera las principales ventajas del uso de cada uno de los sistemas, analizando los siguientes criterios: disponibilidad de mano de obra y materia prima; costo relacionado con la construcción; tiempo de ejecución de la obra y; el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. El método presentado (uso del software plataforma BIM asociado con el método AHP), mostró que el modelaje del proyecto en BIM hizo posibles simulaciones de escenarios, es decir que permitió la simulación de 3 edificaciones utilizando sistema constructivo diferentes (wood frame; steel frame e albañilería) dentro de un mismo proyecto. Así mismo facilitó la extracción de datos, que, a su vez, ayudaron a los especialistas a

seleccionar el sistema constructivo más adecuado considerando los criterios de análisis ponderados y también el ranking que el método AHP sugirió.

El método presentado permite al proyectista el apoyo de una base de datos para la elección y la ponderación de sus preferencias (o los del cliente) en relación con los criterios por ellos determinados esenciales para el emprendimiento proyectado. Las contribuciones académicas de este estudio incluyen el uso de software de plataforma BIM y el método AHP en conjunto para la elección del sistema constructivo más adecuado para cada emprendimiento.

Para trabajos futuros, se sugiere la aplicación de la propuesta dentro de un estudio de caso real con participación de usuarios finales y presentando una reflexión teórica sobre los beneficios dados por la asociación del BIM y del AHP, considerando también otros criterios.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa fue apoyada por el Programa de Pós- Gradación em Engenharia e Construcción civil (PPGECC) la Universidad Federal do Paraná (UFPR).

7. REFERENCIAS

AGACAD. *Metal Framing Wall+*, versao 1.0.0.6.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho*. Rio de Janeiro.

Autodesk. *Revit*, versão 2015.

Cardoso, L. A., (2015). “*Estudo do método construtivo wood framing para construção de habitações de interesse social*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 79 f.

Carvalho, H. J. S., Scheer, S. (2015). “*A utilização de modelos BIM na gestão de resíduos de construção e demolição*”, in: Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, Recife (Brasil).

Caparelli, A. P. A., Crippa, J., Boeing, L. C. (2015), “*Integração das ferramentas BIM e LCA no desenvolvimento de edificações sustentáveis: estudo sobre vedações verticais*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal do Paraná, 103 f.

Creative Decisions Foundation. *SuperDecisions*, versão 2.0.6.

DATec nº020^a (2015). “*Sistema de vedação vertical leve em madeira. Instituto Falcao Bauer de Qualidade de São Paulo*”, Disponível em: <http://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2016/07/datec-20A.pdf>

Dias, G. L. (2005), “*Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (sistema plataforma) submetida a força horizontal no seu plano*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102897>

Dresch, A., Lacerda, D. P., Antunes Júnior, J. A. V. (2015), “*Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*”. Bookman, Porto Alegre, Brasil, p.57.

Eastman, C. et al. (2004) [tradução: Cervantes Golçalves Ayres Filho... et al]; revisão técnica: Eduardo Toledo Santos. Dados eletrônicos, “*Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*”. Bookman, Porto Alegre, Brasil.

Ferreira, A. S. (2015), “*Estudo comparativo de sistemas construtivos industrializados: paraedades de concreto, steel frame e wood frame*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal de Santa Maria.

Fochezatto, A., Ghinis, C. P. (2011), “*Determinantes do crescimento da construção civil no Brasil e no Rio Grande do Sul: evidências da análise de dados em painel*”, Ensaios FEE, 31:648-678.

- Gomes, C. E. M., Vivan, A. L., Sichieri, E., Paliari, J. (2013). “*Light steel frame na produção de moradias no brasil*” in: IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto, Portugal. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/arqs/20150622104044-gomesc2013.pdf>
- Jadid, M. N., Badrah, M. K. (2012), “*Decision support system approach for construction materials selection*”. in: Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, Society for Computer Simulation International, p. 10.
- Jalaei, F., Jrade, A. (2014), “*Integrating Building Information Modeling (BIM) and Energy Analysis Tools with Green Building Certification System to Conceptually Design Sustainable Buildings*”. Itcon, 19:494-519. <http://www.itcon.org/2014/29>
- Jalaei, F., Jrade, A., Nassiri, M. (2015), *Integrating Decision Support System (DSS) and Building Information Modeling (BIM) to Optimize the Selection of Sustainable Building Components*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 20, (25), pp:399-420. <http://itcon.org/paper/2015/25>.
- Jobim, M. S. S., Oliveira, G. G., Da Rosa, M. M., Roman, H. (2006) “*Critérios para seleção de tecnologia na construção civil*”. in: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC), Florianópolis (Brasil), (2006), pp. 2371-2380.
- Jobim, M. S. S., Jobim Filho, H. (2003), “*Sistema de avaliação de materiais e componentes na indústria da construção civil: integração das cadeias produtivas*”. Relatório Técnico FINEP. Santa Maria: UFSM.
- Kokubun, Y. E. (2014). “*O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 171 f. <http://dx.doi.org/10.11606/D.16.2014.tde-02072014-101053>
- Leite, I. M. S., Freitas, F. F. T. (2102). “*Análise comparativa dos métodos de apoio multicritério à decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEÉ*”. in XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Bento Gonçalves (Brasil).
- Lukka, K. (2003). “*The Constructive Research Approach*”. in: OJAL, L.; HILMOLA, O-P. (Eds.), Case Study Research in Logistics, Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, Series B1.
- Mahapatra, K., Gustavsson, L., Hemstrom, K., (2012), “*Multi-storey wood-frame buildings in Germany, Sweden and the UK*”, Constr. Innov. Inf. Process. Manag. 12(1):62–85. <http://dx.doi.org/10.1108/14714171211197508>
- Marcos, M., Yoshioka, E. (2015). “*Uso de ferramenta BIM para auxiliar na escolha do sistema construtivo que gera menor impacto ambiental*”. in: 7º Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação de Comunicação na Construção, Recife (Brasil). <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-2015-066>
- Manrique, J. D., et al. (2015), *Automated generation of shop drawings in residential construction*, Automation in Construction. 55:15–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.004>
- Marinho, A. J. C. (2014). *Aplicação do Building Information Modeling na gestão de projetos de construção*. 63p. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis), Universidade do Minho.
- Molina, J. C., Calil Júnior, C. (2010), “*Sistema Construtivo em Wood Frame para Casas de Madeira*”. in: Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina (Brasil), 31(2):143-156. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2010v31n2p143>
- Marcondes, F. C. S., Cardoso, F. F. (2005). “*Contribuição para aplicação do conceito de logística reversa na cadeia de suprimentos da construção civil*”. in: Simpósio Brasileiro Gestão e Economia da Construção, Porto Alegre (Brasil).
- Marcos, M. H. C. (2015). *Metódo de obtenção de dados de impactos ambientais, durante o processo de desenvolvimento do projeto, através do uso de ferramenta BIM*, Tese de deutorado, Universidade de São Paulo.

- Mardani, A. et al. (2015), Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 28(1):516-571. <http://dx.doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Mello, L. C. B. B. (2007). “*Modernização das pequenas e médias empresas de Construção Civil: impactos dos programas de melhoria da gestão da qualidade*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense.
- Milan, G. S., Novello, R. V., Dos Reis, Z. C. (2011), *Viabilidade do sistema Light Steel Frame para construções residenciais*. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa.
- Oliveira, E., Scheer, S., Tavares, S. F. (2015), *Avaliação de impactos ambientais préoperacionais em projetos de edificações e a Modelagem da Informação da Construção*. In: TIC, Recife (Brasil).
- Saaty, T. L. (1990), How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. 48:9–26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Santiago, A. K., Araújo, E. C. (2008) “*Sistema light steel framing como fechamento externo vertical industrializado*”. in: 3º Congresso Latino Americano da Construção Metálica. <http://www.abcem.org.br/construmetal/2008/contribuicoes2.php>
- Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequena Empresa (SEBRAE). (2008). “*Cadeia produtiva da construção civil: Cenários econômicos e estudos setoriais*”. http://189.39.124.147:8030/downloads/Construcao_civil.pdf. Acesso em 30 mai. 2017
- Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF) (2017). “*Produção Florestal*”, 2017. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>>. Acesso em 08 ago. 2017
- Sousa, A. M. J., Martins, N. T. B. S. (2009). “*Potencialidades e obstáculos na implantação do sistema light steel framing na construção de residências em palmas – TO*”, Trabalho de conclusão de curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins.
- Succar, B. (2008), disponível em: <http://changeagents.blogs.com/Public_Sharing/OICE-BIM-Forum-BilalSuccar-20160420.pdf>. Acessado em 25 jan. 2017.
- Suermann, P.C. (2009). “*Evaluating the impact of Building Information Modeling (BIM) on construction. Flórida*”, University of Flórida.
- Vargas, R. V. (2010). “*Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process-AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio*”. in: 29º PMI Global Congress (2010), pp. 31.
- Velasquez, M., Hester, P. T. (2013), *An analysis of multi-criteria decision making methods*. International Journal of Operations Research. 10(2):56-66.
- Vivan, A. L. (2011). “*Projetos para produção de residências unifamiliares em light steel framing*”. 226 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4658.fcab>