

Análisis de durabilidad del hormigón armado con fisuras inducidas por la carga

S. M. M. Pinheiro¹ , M. P. Costa Junior^{1*} 

*Autor de Contacto: milton.paulino@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

Recepción: 11/09/2020 | Aceptación: 11/03/2021 | Publicación: 01/05/2021

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es verificar la relación entre la acción de cargas que inducen fisuras y la durabilidad del hormigón armado. Fueron producidos modelos de prueba (especímenes) prismáticos y durante dos años estas muestras fueron sometidas a niebla salina artificial, bajo la acción de una carga central permanente, carga central a corto plazo sin carga (referencia), con un curado de 7 días. Se realizaron pruebas de penetración de cloruros y análisis microestructurales, además del mapeo de fisuras. Se encontró que la carga no influyó en los resultados de penetración de cloruros, sin embargo, se observa que las micrografías y microanálisis muestran una formación de productos de deterioro y posibles microorganismos, en comparación con las probetas que no sufrieron carga.

Palabras clave: durabilidad; carga; craqueo; cloruros; microscopía.

Citar como: Pinheiro, S. M. M., Costa Junior, M. P. (2021), “Análisis de durabilidad del hormigón armado con fisuras inducidas por la carga”, Revista ALCONPAT, 11 (2), 17 – 37, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor M.P.Costa Junior on las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión, redacción y preparación del texto origina; S.M.M. Pinheiro ontribuyó con las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2022.

Durability analysis of reinforced concrete with loading induced cracks

ABSTRACT

The objective of this study is to verify the relationship between the action of loads inducing cracks and the durability of reinforced concrete. Prismatic specimens were produced and for two years these samples were subjected to artificial salt spray, under the action of different types of loading and unloaded (reference), with moist curing for 7 days. Chloride penetration tests and microstructural analysis were carried out. It was observed that loading did not influence the results of chloride penetration. However, it was observed that in the micrographs and microanalysis of the cracked samples the clearer formation of deterioration products and possible microorganisms, compared to the samples that did not suffer loading.

Keywords: durability; loading; cracking; chlorides; microscopy.

Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento

RESUMO

O objetivo desse trabalho é verificar a relação entre a ação de carregamentos induzindo fissuras e a durabilidade do concreto armado. Foram produzidos corpos-de-prova prismáticos e durante o período de dois anos estas amostras foram submetidas à névoa salina artificial, estando sob a ação de carregamento central permanente, carregamento central de curta duração e sem carregamento (referência), sendo realizados ensaios de penetração de cloretos e análise microestrutural, além do mapeamento das fissuras. Verificou-se que o carregamento não influenciou nos resultados de penetração de cloretos, porém, nas micrografias e microanálises das amostras fissuradas observou-se a formação de produtos de deterioração e possíveis microorganismos, em comparação aos corpos-de-prova que não sofreram carregamento.

Palavras-chave: durabilidade; carregamento; fissura; cloretos; microscopia.

Información Legal

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

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

Las causas del proceso de deterioro del hormigón armado están directamente relacionadas con la acción de agentes agresivos. Entre los diversos agentes existentes (dióxido de carbono, iones de cloruro y ataque de sulfatos), se encuentra la acción deletérea de los cloruros y el dióxido de carbono (CO_2), que han sido ampliamente estudiados en los últimos años y que siguen siendo un gran desafío para el buen desempeño de estructuras de hormigón armado. Así, las estructuras que están expuestas al medio marino y urbano demandan una calidad mínima del material para asegurar la vida útil y durabilidad de proyecto (Andrade, 2005; Cascudo, 2005; Silvestro et.al., 2021).

Además de las causas químicas, se destacan las causas del proceso de deterioro mecánico, como la sobrecarga y las cargas cíclicas; cuyo síntoma principal es el agrietamiento del hormigón. Estas fisuras deben ser controladas, principalmente por tres motivos: durabilidad por riesgo de corrosión de la armadura, aspecto estético y requisitos funcionales como higiene (proliferación de hongos, microorganismos, etc.) y permeabilidad a gases y agua (Ghali y Favre, 1994; Hearn y Figg, 2001). En condiciones de exposición natural, la durabilidad del hormigón está controlada por su capacidad para prevenir el transporte de iones y fluidos. A menudo el hormigón está sujeto a varios tipos de tensiones (térmicas, mecánicas, etc.) que generan tensiones de tracción que superan la resistencia del material, generando fisuras, que pueden afectar el transporte de agentes agresivos a la mezcla (Lim et al, 2000; Hearn y Figg, 2001; Mehta y Monteiro, 2014).

Las fisuras que se manifiestan por la acción de cargas externas pueden actuar como un factor importante para la entrada de agentes agresivos como iones de cloruro y CO_2 (carbonatación). Sin embargo, los estudios muestran que las fisuras no son el mayor factor de deterioro de la estructura por corrosión (entrada de agentes agresivos) si no superan las aberturas estipuladas por las normas internacionales y NBR 6118 (ABNT, 2014). En este caso, la calidad del hormigón de revestimiento y el revestimiento nominal en sí son más relevantes para su durabilidad (Konin et. Al., 1998; Helene y Diniz, 2001; Alexander et al, 2001; Cascudo, 2005).

Independientemente de la carga, las características de las fisuras (conectividad, apertura, ancho, largo) juegan un papel fundamental en la durabilidad de las estructuras de hormigón. En este sentido, la NBR 6118 (ABNT, 2014) establece la apertura máxima característica por agrietamiento (identificada en la norma como W_k) y protección de las armaduras en términos de durabilidad. Esta norma define la apertura máxima de la fisura de 0,4 mm para el hormigón armado, que varía según la clase de agresividad ambiental, el tipo de estructura de hormigón y las combinaciones de acciones de servicio.

La penetración y difusión de iones cloruro puede ocurrir a través de la fisura como se muestra en la Figura 1.

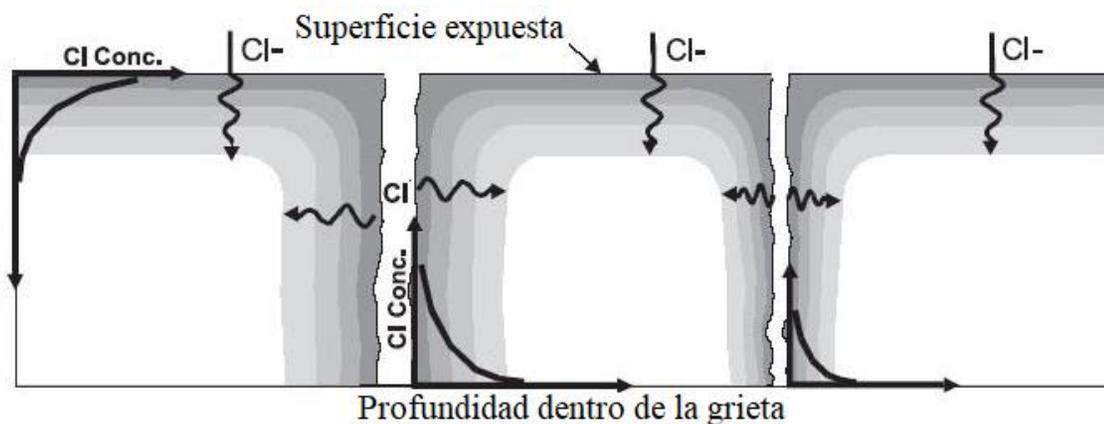


Figura 1. Penetración de cloruros en la superficie y entre fisuras (Ismail et.al., 2006).

Las fisuras actúan como puerta de entrada de agentes agresivos, que tienen un efecto significativo en la difusión de cloruros, ya que facilitan el movimiento de estos agentes a través del hormigón, cuya intensidad depende directamente de la apertura de la fisura (Wang et.al., 2016).

Cuando los iones cloruro se encuentran dentro de la fisura, pueden penetrar a diferentes profundidades, partiendo de la superficie interior de la misma, disolviéndose en la fase acuosa de los poros, formando cloruros libres, que pueden desencadenar el proceso de deterioro del material. También se observa que la concentración de cloruros es alta en la superficie expuesta del concreto, sin embargo, al penetrar en la abertura de la fisura, disminuye con el aumento de la profundidad desde la superficie del material (Ismail et. Al., 2006; Figueredo, 2005; Win y otros, 2004).

Además de los cloruros libres en las soluciones de los poros del hormigón, también puede encontrarlos: combinados químicamente con C-S-H, o como cloroaluminatos, adsorbidos físicamente en las paredes de los poros o libres en las soluciones de los poros del hormigón (Romano, 2009; Crauss, 2010).

De los iones cloruro que penetran en el hormigón, una parte se une al aluminato tricálcico (C_3A) formando principalmente cloroaluminato de calcio, también conocido como sal de Friedel - $C_3A.CaCl_2.10H_2O$, que se incorpora a las fases del cemento hidratado. Otra parte se absorbe en la superficie de los poros y el resto se disuelve en la fase acuosa de los poros, que forman los cloruros libres que son peligrosos y causan daño a la estructura (Helmuth y Stark, 1992; Figueredo, 2005; Crauss, 2010).

En general, siempre existirá un estado de equilibrio entre las tres formas de ocurrencia de estos iones, de manera que siempre habrá un cierto contenido de Cl^- libre en la fase líquida del hormigón (Helmuth y Stark, 1992; Fortes y Andrade, 1995; Cascudo, 1997). Los cementos con niveles bajos de C_3A tienen menos capacidad para inmovilizar iones cloruro mediante la formación de cloroaluminato de calcio hidratado. Con la formación de este compuesto, hay una disminución en la concentración de iones cloruro libres en la solución acuosa de los poros del hormigón.

La penetración de los cloruros en forma de cloruros libres depende de factores como el tipo de iones positivos (cationes) asociados a los cloruros, el momento de acceso al hormigón antes o después del endurecimiento, la presencia de otro ión negativo (anión) como el sulfato, el tipo de cemento utilizado en la producción de hormigón, la calidad de la producción y curado del hormigón, la humedad ambiental, la relación agua/cemento, el estado de carbonatación y el consumo de cemento por m^3 de hormigón. Analizando la resistencia a la penetración de iones cloruro, Leng et.al. (2000) y Oh et.al. (2002) encontraron que la difusión de iones cloruro aumenta con el aumento de la relación agua/cemento, y los cementos con cenizas volantes y escoria de horno alto tienen alta resistencia a la difusión (Helene, 1997; Song et. al., 2008; Lawrence, 2006).

En este contexto, este artículo presenta un análisis de la durabilidad en hormigón armado bajo diferentes condiciones de carga, durante el período de 24 meses. Se analizó la profundidad de penetración de los iones cloruro, además del análisis microestructural.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El programa experimental se llevó a cabo con los siguientes pasos: caracterización de los materiales, dosificación de las muestras. Después de la dosificación, se moldearon dos tipos de muestras (prismáticas y cilíndricas).

Después de moldear y deformar, los modelos de prueba prismáticos se sometieron a curado húmedo durante 7 días, luego se aplicaron diferentes tipos de cargas y se sometieron a niebla salina, en un ambiente natural hasta las fechas de prueba (edades 6, 12, 18 y 24 meses). En estas edades, se evaluaron las profundidades de cloruro y se realizó el Análisis Microestructural (SEM y EDS).

En cuanto a las probetas cilíndricas, después del moldeo se deformaron y curaron (curado en húmedo) durante 28 días. Al final de este período, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión axial.

El trabajo finalizó con el análisis de los resultados y las consideraciones finales. Todos estos pasos serán detallados a continuación.

En cuanto a los materiales, el cemento Portland utilizado en esta obra fue CP III 40-RS (cemento Portland de Alto Horno), cuya concentración de escoria granular de alto horno en el cemento puede llegar al 75%. Para la composición de la mezcla se utilizaron los siguientes materiales: arena (mediana) de río, disponible y utilizada en la región de Campinas - SP, grava 9.5/25 (B1 - basalto) con una dimensión característica máxima de 19 mm y polifuncional aditivo a base de lignosulfonato, con una masa específica de 1,18 g/cm³. En la producción de los modelos de prueba de hormigón prismático se utilizó una barra de acero CA50 con un diámetro nominal de 10 mm. Las mezclas experimentales elegidas según la dosificación del hormigón utilizado en esta investigación, cuya proporción de aglomerado: agregado adoptados fue de 1: 5 en masa. En este sentido, cumpliendo con este requisito, la traza adoptada fue 1: 2: 3 (cemento: arena: grava) (en masa), con una relación agua/cemento de 0,42.

La elección de la relación cemento: arena: grava de 1: 2: 3 se debió a su buena concentración de mortero. Se adoptó la relación agua / cemento de 0,42 con el objetivo de obtener hormigón más resistente a la exposición en medios agresivos, según la NBR 6118 (ABNT, 2014). La clase adoptada para el hormigón moldeado en este estudio fue C50. La dosificación y la relación agua/cemento adoptada en este trabajo se utilizan y evalúan desde el año 2000 dentro del proyecto de investigación sobre durabilidad de la capa de recubrimiento, en el laboratorio de materiales de construcción de la Unicamp.

La cantidad de aditivo utilizado fue necesaria para mantener una adecuada trabajabilidad para el molde de los modelos de prueba en mesa vibratoria, debido a la baja relación agua/cemento empleada. El índice de consistencia, determinado por la prueba de revenimiento (4 ± 1 cm), se encontró mediante un tronco cónico (según NBR 16889, 2020). Este valor de abatimiento, a pesar de no ser muy utilizado en las obras comunes, se adoptó para el hormigón, ya que se deseaba obtener una trabajabilidad mínima en la que el hormigón fuese moldado para la producción de modelos de prueba con vibración mecánica.

El consumo de materiales utilizados para moldear los modelos de prueba prismáticos y cilíndricos se puede ver en la tabla 1.

Tabla 1. Especificación de los materiales utilizados en el trabajo experimental.

	Cemento (Kg/m³)	Aditivo (Kg/m³)	Arena (Kg/m³)	Grava (Kg/m³)	Agua (Kg/m³)
1 : 2 : 3 : 0,42	398	2,4	796	1194	167

Para la caracterización del hormigón se utilizaron modelos de prueba cilíndricos, evaluando sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión axial) (Tabla 2).

Tabla 2. Serie de probetas cilíndricas.

Serie	Tipo de curado	Fecha de la prueba
M6um	Inmerso hasta la fecha de la prueba	28 días
M12um		
M18um		
M24um		

La mezcla usada fue mecánica, utilizando una hormigonera de eje inclinado. Para cada serie, se moldearon y ensayaron 4 modelos de prueba cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura a la edad de 28 días, según NBR 5739 (ABNT, 2018). Los modelos de prueba fueron moldeados en dos capas, sobre mesa vibratoria, en el tiempo necesario para permitir una adecuada compactación

del hormigón en el molde, según NBR 5738 (ABNT, 2015).

Después del moldeo, los cuerpos de prueba se cubrieron con lonas plásticas hasta el momento de la deformación, que ocurrió 48 horas después del momento del moldeo. Este período de liberación se adoptó debido a la deformación de los especímenes prismáticos. Luego, las muestras se sometieron a curado sumergido durante 28 días.

Se moldearon 6 modelos de prueba prismáticos para cada edad (6, 12, 18 y 24 meses), 2 de las muestras sin carga, 2 de las muestras bajo carga central de corta duración y 2 de las muestras bajo carga central permanente, en las dimensiones de 1.39x0.1x0.1m. Los moldes se definieron en estas dimensiones porque son los mismos que se utilizan en otras investigaciones realizadas en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Unicamp.

La mezcla del hormigón para la producción de los cuerpos de prueba prismáticos fue mecánica en una hormigonera de eje inclinado. Se utilizó una barra de acero CA50 con un diámetro nominal de 10 mm ($\varnothing 10$), con un recubrimiento nominal de 30 mm, aunque la corrosión del acero no es el alcance de este trabajo. La cobertura adoptada (30 mm) se definió según el trabajo realizado por Martins (2001), además del trabajo de Midness y Young (1981), Illston (1994), Alexander et.al. (2001) y Figueiredo y Nepomuceno (2004).

Los modelos de prueba prismáticos se moldearon de dos en dos. Para mantener la cobertura se colocaron 3 espaciadores de 30 mm a lo largo de la barra de acero. La figura 2 muestra las dimensiones del cuerpo de prueba prismático y la posición de la barra de acero.

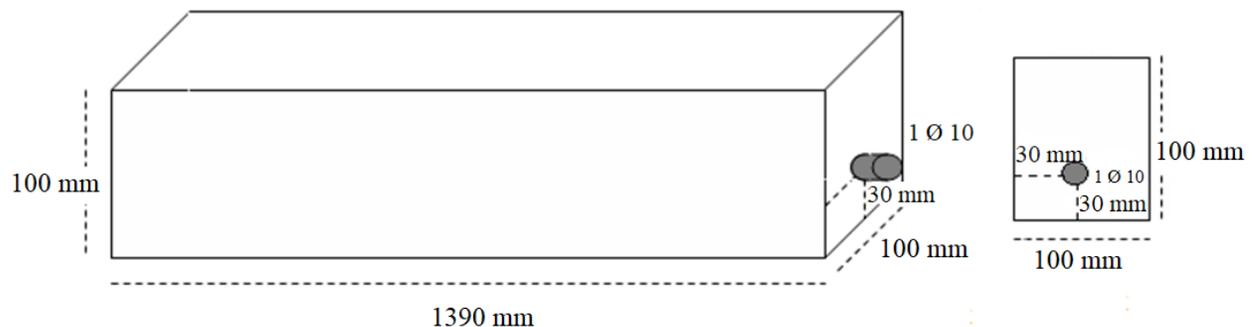


Figura 2. Esquema de dimensiones de los modelos de prueba prismáticas.

Después del moldeo, los especímenes prismáticos permanecieron en los moldes durante 48 horas, cubiertos con lona plástica. Este plazo se adoptó porque no fue posible deformar y principalmente transportar estos especímenes antes de las 48 horas, ya que se agrietaron durante la manipulación.

Después de este período, se sometieron a un curado húmedo, donde se sumergieron en agua saturada de cal hasta la edad de 7 días. Este período se definió con base en las recomendaciones de Thomaz (2005), Castro (2003), Braun (2003) y ACI 308 (2016), que determinaron al menos 7 días de curado, independientemente del tipo de cemento adoptado. Además de las referencias mencionadas, se adoptó la edad de 7 días de curado por ser el término utilizado en las obras brasileñas para el curado de piezas estructurales.

Se definió la forma de cargar los especímenes prismáticos, que tendría las siguientes situaciones:

- Sin carga (SC). Se adoptó para que sirva de referencia en la comparación entre los otros dos tipos de carga.
- Carga central a corto plazo (CCCD). Aplicación de una fuerza P concentrada a la muestra prismática hasta que aparezca la primera fisura, y luego se retira. Optamos por la elección de esta carga para comprobar el comportamiento del hormigón ante una situación de fisuras que puedan surgir a lo largo de la vida de la estructura por la acción de cargas puntuales, es decir, casos en los que exista una sobrecarga de corta duración. sobre la estructura, con apariencia de fisura. En este caso, como la carga es de corta duración, la fisura puede

desaparecer cuando se retira la carga, pero ya se han producido tensiones y microfisuras internas en el material;

- Carga central permanente (CCP). Los modelos de prueba prismáticos sufrieron una carga hasta la fecha de las pruebas de durabilidad. Este tipo de carga se eligió para que el modelo de prueba prismática presentara fisuras superficiales y permaneciera abierta durante todo el período de exposición, hasta las fechas de prueba. Así, en las fechas de ensayo se puede observar la influencia de la fisura en la profundidad de penetración del cloruro y en la microestructura del hormigón.

Para la máxima apertura de fisura, se adoptó como parámetro el límite establecido por la norma NBR 6118 (ABNT, 2014) de durabilidad, relacionado con fisuración y protección de la armadura, según la clase de agresividad ambiental. Así, la apertura máxima de la fisura en los modelos de prueba prismáticos, que estaban bajo carga constante, estaba entre 0,3 mm y 0,4 mm (Figura 3). Las aberturas de fisuras se mapearon a lo largo del tiempo, hasta la fecha de prueba de las muestras.



Figura 3. Medición de la apertura de la fisura en el centro de la muestra prismática con un fisurómetro.

Los especímenes prismáticos estuvieron bajo carga constante hasta las fechas de prueba. El esquema que se muestra en la Figura 4 muestra los modelos de prueba prismáticos apoyadas sobre especímenes cilíndricos de hormigón (10x20 cm) con un pórtico central compuesto por dos placas de acero y dos barras roscadas (9,5 mm, 3 tuercas, 3 arandelas y dos placas de acero de 8x300x100 mm) aplicando la carga de 250 kgf, provocando agujeros en el centro de las vigas, con aberturas de hasta 0,3 mm (dentro de los límites de la norma NBR 6118). La carga se realizó aplicando un torque de 0.5 Kgfm, con una llave dinamométrica, a las barras roscadas y, consecuentemente, se aplicó la fuerza concentrada al modelo de prueba prismático causando la fisura.



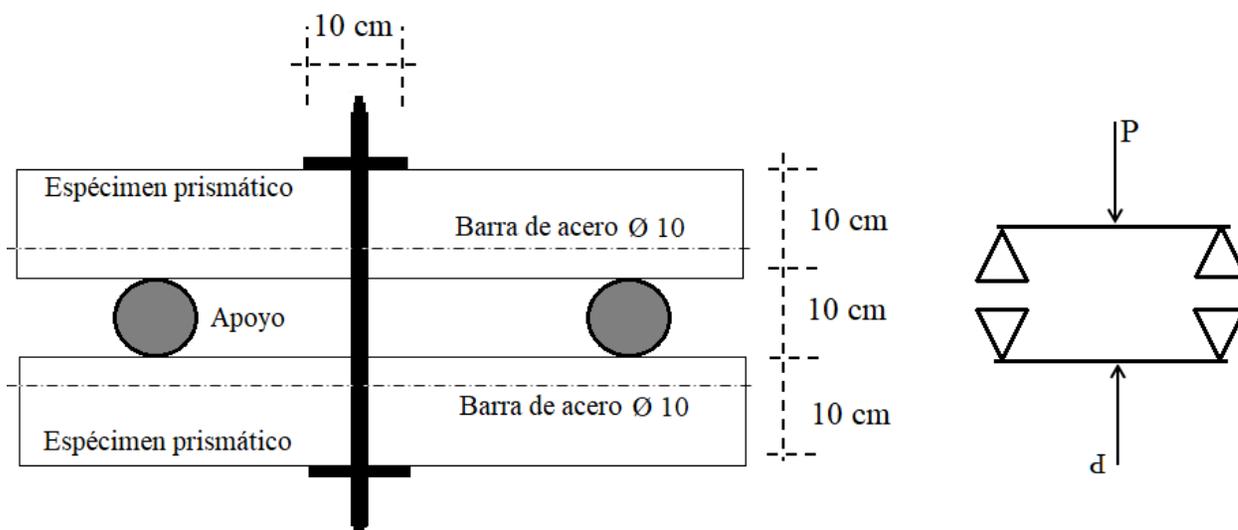


Figura 4. Carga central permanente (CCP) en los prismas.

La Tabla 3 muestra la secuencia adoptada para las muestras de cada serie de moldes, bajo las diferentes condiciones de carga y fechas de prueba de durabilidad.

Tabla 3. Muestras de cada serie de molduras, bajo condiciones de carga.

Muestra	Muestra sin carga	Muestra debajo Cargando Centro de corta estancia	Muestra debajo Carga central permanente	Fecha ensayo
M6um	M6umSC	M6umCCCD	M6umCCP	06 meses
M12um	M12umSC	M12umCCCD	M12umCCP	12 meses
M18um	M18umSC	M18umCCCD	M18umCCP	18 meses
M24um	M24umSC	M24umCCCD	M24umCCP	24 meses

Después de un curado húmedo de siete días, las muestras pasaron a través de niebla salina hasta la edad de prueba. El propósito de la neblina fue simular un ambiente salino, en ese sentido se pulverizó manualmente una solución de NaCl sobre los modelos de prueba prismáticos hasta su humectación, con una periodicidad de 3 veces a la semana y tres veces al día.

La concentración de sal en el agua de mar es de 35 gramos de NaCl por cada litro de agua. En este sentido, esta cantidad de 35 g/l de NaCl se utilizó para la solución simulando la niebla salina.

La pulverización de la solución de cloruro se produjo hasta las fechas de prueba de los cuerpos de prueba prismáticos. La elección de esta metodología se basó en el trabajo de Arya y Darko (1996) quienes realizaron ensayos de corrosión en vigas de hormigón utilizando el mismo procedimiento. Para determinar la profundidad de penetración de los cloruros se rompió la sección transversal de las muestras, cuya evaluación se realiza mediante la aspersion de nitrato de plata (solución 0.1N) sobre la superficie del concreto, ocurriendo una reacción fotoquímica, donde los cloruros libres presentes en el concreto reaccionan con los iones de plata de la solución de nitrato de plata para formar un precipitado blanco. En regiones donde no hay iones cloruro o cloruro combinados, se presenta la aparición de un color marrón, el óxido de plata, debido a la reacción entre los iones de plata y los hidroxilos presentes en los poros del material cementoso (Jucá et.al., 2002; Real et.al., 2015). A través de este método, el objetivo es evaluar si el frente de cloruro llegó a las armaduras. Los pasos de la prueba se pueden ver en la Figura 5.

El corte en estos ejemplares prismáticos se realizó en los tercios medios, donde se aprecian las zonas comprimidas y estiradas de los ejemplares prismáticos.



Figura 5. Ensayos de penetración de cloruro con spray de nitrato de plata.

Para el análisis microestructural, se tomaron muestras de los modelos prismáticos inmediatamente después de su corte o rotura y antes de que se realizaran las pruebas de durabilidad, para que las muestras no se contaminen con soluciones de nitrato de plata (Figura 6). En este trabajo solo se presentaron los resultados del análisis microestructural a los 6 meses y 24 meses, que fueron la primera y última edad de los ensayos, respectivamente.

Las muestras se retiraron de las áreas de cobertura, con una profundidad máxima de 1,5 cm. En los modelos de prueba fisurados se tomaron muestras en la región fisurada (la muestra se tomó exactamente en la abertura de la fisura o lo más cercano a ella), siempre en la región rota del espécimen prismático, para ser observado por SEM (Scanning Electron Microscope). Debido a que el hormigón no es un material conductor, las muestras tuvieron que metalizarse con oro. Estas muestras se tomaron con un cincel de acero y un martillo. Las observaciones se realizaron en el Laboratorio Nacional de Luz Sincontron (LNLS), en Campinas, Estado de São Paulo.

En este trabajo se adoptó la medida energética (EDS). En este caso, existe la ventaja de una rápida identificación de los elementos químicos presentes (Dedavid et al, 2007).

Área donde se tomó la muestra para pruebas de microestructura



Figura 6. Lugar donde se tomó la muestra para ensayos de microestructura.

Los resultados obtenidos se analizaron mediante técnicas de estadística descriptiva (cálculo de la media, desviación estándar) para caracterizar las variables (propiedades del hormigón y comportamiento frente a los cloruros).

Para determinar diferencias estadísticamente significativas (el nivel de significancia adoptado fue del 5%) entre los promedios de los resultados se utilizaron pruebas de hipótesis paramétricas - ANOVA y DUCAN (Montgomery, 1991).

Se utilizó el programa statgraphics para realizar las pruebas estadísticas. El programa construyó varias pruebas para comparar la penetración promedio de cloruro entre todas las muestras. La prueba F de la tabla ANOVA verificó si existen diferencias significativas entre los promedios de los resultados, con relación a los tipos de curado y carga.

3. RESULTADOS

Los resultados de la resistencia a la compresión axial a los 28 días de edad del hormigón, referidos a las molduras realizadas sobre los modelos de prueba cilíndricos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de resistencia a la compresión axial.

Hormigón (modelos de prueba cilíndricos)	Curado de los modelos cilíndricos	Edad de ruptura	Resistencia a la compresión axial (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
M6um	Inmerso hasta 28 días	28 días	66,2	4,3	6,6
M12um			50,2	2,6	5,3
M18um			59,7	4,1	7,0
M24um			56,8	2,6	4,6

Como puede observarse en la Tabla 4, las medias de los resultados de la resistencia a la compresión axial estuvieron en el rango de 44MPa a 66MPa y los resultados disminuyeron en este orden: M6um, M18um, M24um, M12um. Esta diferencia de resultados puede deberse a varios motivos, como la temperatura y la humedad en el momento del moldeo, así como al transporte, mezclado, lanzamiento, densificación y curado del hormigón utilizado.

En cuanto al coeficiente de variación, al utilizar el parámetro de la norma ACI 214R (2002) para verificar cómo fue la variación atribuida al muestreo, preparación de la muestra, curado y pruebas de laboratorio, se observa que, en la clasificación que presenta esta norma, el coeficiente de variación de las muestras M12um y M24um se considera bueno ($<5,5$), con la excepción de las muestras M18um y M6um, que a pesar de los altos valores de resistencia, se consideran débiles ($>5,5$).

Como se verifica en la literatura, la resistencia a la compresión de concreto con el uso de cementos con altos niveles de escoria tiende a aumentar con el tiempo y la ganancia de resistencia puede ocurrir en períodos más prolongados. Estudios como el de Khatib y Hibbert (2005) apuntan a un crecimiento aún mayor a partir de los 28 días de edad, en este sentido se puede esperar una mejora aún mayor en los resultados de resistencia de este trabajo.

Durante todo el tiempo que los ejemplares prismáticos sometidos a carga central permanente estuvieron expuestos en el ambiente, se realizó el mapeo de las fisuras, como se muestra en la Figura 7 (6 meses de edad) y Figura 8 (24 meses de edad).

M6umCCP

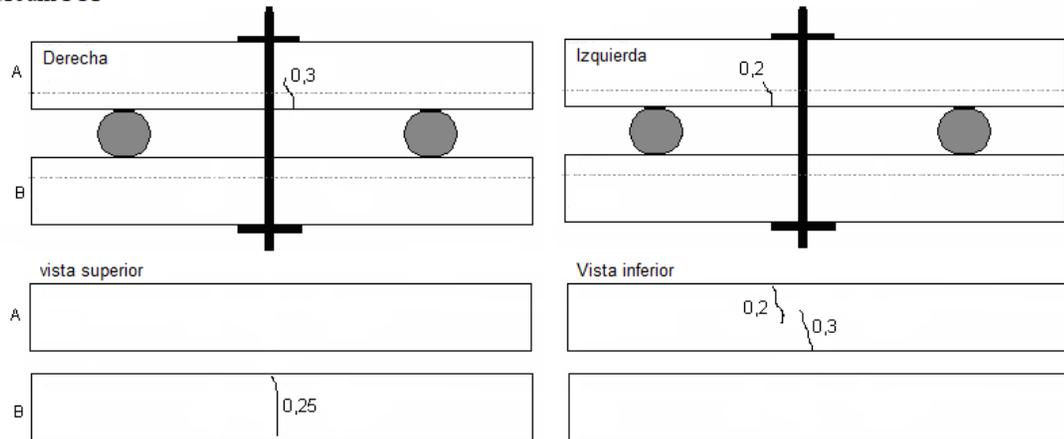


Figura 7. Mapeo de fisuras en hormigón que han estado bajo carga central permanente durante 6 meses (M6umCCP).

El hormigón M6umCCP en la Figura 7 tenían aberturas de fisuras de 0.2 mm y 0.3 mm. A lo largo del período de exposición hubo un aumento de 0,3 mm a 0,4 mm y de 0,25 mm a 0,35 mm.

M24umCCP

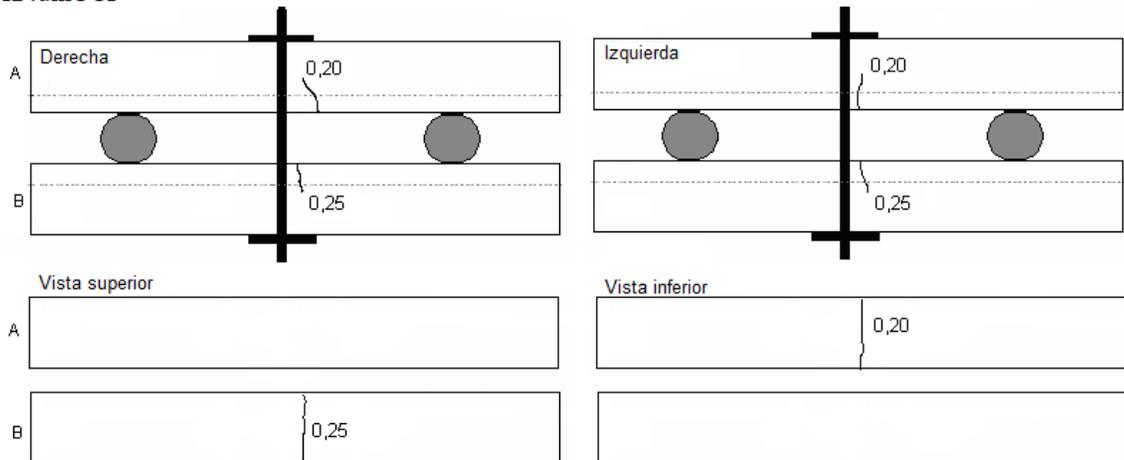


Figura 8. Mapeo de fisuras en modelos de hormigón que ha estado bajo carga central permanente durante 24 meses (M24umCCP).

Se observó en los primeros seis meses de edad que el pórtico utilizado para la aplicación de la carga, así como el monitoreo de la apertura de la fisura fue efectivo, ya que la apertura de la fisura estuvo en el rango de 0.3mm y 0.4mm, como se detalla en el programa experimental.

Las fisuras en las muestras prismáticas M24umCCP (sometidas a curado en húmedo) tenían aberturas que iban desde 0,20 mm a 0,25 m. A los 24 meses, el comportamiento de las fisuras fue similar al de otras edades. Las aberturas iniciales fueron de 0,2 mm a 0,25 mm, alcanzando los 0,4 mm en las edades de prueba.

Algunos factores pueden haber provocado el aumento de las aberturas de fisuras en los modelos a lo largo del tiempo, entre los que podemos destacar la carga aplicada permanentemente a estos modelos de hormigón y el tiempo que estuvieron sometidos a esta carga. Se esperaba que la apertura de la fisura no se mantuviera constante debido a las propiedades propias del material (como la fluencia), incluso con el apoyo de la barra de acero. El torque aplicado a las probetas también puede haber influido en las aberturas de la fisura, ya que, aunque el valor de torque se ha definido experimentalmente, cada concreto (en las edades de ensayo y curado) puede presentar respuestas diferentes, como se observa en el mapeo, en que algunas muestras tenían aberturas de fisuras más grandes.

En estudios realizados por Vidal et al (2004; 2007) y François et al (2006), que mapearon las aberturas de fisuras resultantes de la carga, en ambiente salino durante 14 y 17 años, respectivamente, se pueden observar dos tipos de fisuras, la transversal, inducidas por la acción de carga (flexión), y las longitudinales en la viga que hacen referencia a la corrosión de la armadura, es decir, fisuras que coinciden con la armadura.

3.1 Profundidad de penetración de cloruros

La Tabla 5 presenta los resultados de la profundidad de penetración de cloruros en hormigón sin carga, bajo carga central de corto plazo y bajo carga central permanente.

Tabla 5. Profundidad de penetración de cloruros bajo diferentes condiciones de carga y sin aplicación de carga.

Muestra	Promedio (mm)	Desviación estandar
M6umSC	0,1	0,1
M12umSC	2,2	0,6
M18umSC	2,3	1,3
M24umSC	2,6	0,7
M6umCCCD	0,2	0,0
M12umCCCD	2,2	0,7
M18umCCCD	1,9	1,1
M24umCCCD	2,5	0,6
M6umCCP	3,3	1,8
M12umCCP	1,7	0,8
M18umCCP	0,3	0,0
M24umCCP	3,0	1,0

La Tabla 6 muestra las comparaciones estadísticas entre los tres tipos de carga utilizados en este trabajo: carga permanente única - CCP, carga a corto plazo - CCCD, sin carga - SC, en las diferentes edades de prueba, para los resultados de penetración de cloruros.

Tabla 6. Comparación entre los resultados de la penetración de cloruros.

Hormigón (cuerpos de hormigón prueba prismática)	Edad en ensayo	Diferencia entre resultados de penetración de cloruro
M6umCCP – M6umCCCD	6 meses	No (Penetración cloruro CCP > Penetración cloruro CCCD)
M6umCCP – M6umSC		No (Penetración cloruro CCP > Penetración cloruro SC)
M6umCCCD - M6umSC		No (Penetr. cloretos CCCD > Penetr. cloretos SC)
M12umCCP – M12umCCCD	12 meses	No (Penetración cloruro CCP < Penetración cloruro CCCD)
M12umCCP – M12umSC		No (Penetración cloruro CCP < Penetración cloruro SC)
M12umCCCD – M12umSC		No (Penetración cloruro CCCD = Penetración cloruro SC)
M18umCCP – M18umCCCD	18 meses	No (Penetración cloruro CCP < Penetración cloruro CCCD)
M18umCCP – M18umSC		No (Penetración cloruro CCP < Penetración cloruro SC)
M18umCCCD – M18umSC		No (Penetración cloruro CCCD < Penetración cloruro SC)
M24umCCP – M24umCCCD	24 meses	No (Penetración cloruro CCP > Penetración cloruro CCCD)
M24umCCP – M24umSC		No (Penetración cloruro CCP > Penetración cloruro SC)
M24umCCCD – M24umSC		No (Penetración cloruro CCCD < Penetración cloruro SC)

A los 6 meses y 24 meses, la penetración de cloruros fue mayor con los modelos de hormigón sometidos a carga central permanente en comparación con los modelos de hormigón sometido a cargas centrales de corta duración y sin carga; sin embargo, en estos casos no hubo diferencia significativa entre los resultados. A los 12 meses de edad, los modelos de hormigón con carga central permanente presentaron valores menores de penetración de cloruros que el hormigón sometido a cargas de corta duración y sin carga, en cuyo caso tampoco hubo diferencias significativas entre los resultados.

Durante los 24 meses de edad, la acción de carga, ya sea a corto plazo o permanente, no influyó significativamente en los resultados de la penetración de cloruros en casi todas las edades estudiadas.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en la investigación de Vidal et al (2004), Vidal et al (2007) y François et al (2006), se observa que el factor tiempo y el ambiente salino son fundamentales para la carga y, en consecuencia, la apertura de fisuras, influye en los resultados de la penetración de cloruros. Investigaciones como la de Vidal et al (2007), que dejaron las muestras expuestas en ambientes bajo niebla salina por un período de más de 10 años, obtuvieron resultados significativos solo después de 5 años de exposición. En este sentido, se deben considerar períodos más largos en futuras investigaciones.

Analizando el comportamiento de muestras con diferentes porcentajes de escoria de alto horno, sometidas a carga continua, An Cheng et al (2005) verificaron que la apertura de la fisura afecta el tiempo de inicio de la corrosión de las armaduras. Los modelos de prueba con mayor apertura de fisuras fueron los que primero iniciaron el proceso corrosivo; sin embargo, la cantidad de escoria agregada a la mezcla no influyó en los resultados, es decir, con el aumento del contenido de escoria de alto horno no hubo disminución en la velocidad y propagación de la corrosión de la armadura. Según Ayra y Darko (1996), la frecuencia de aparición de fisuras influye en la intensidad de la corrosión a la que está sometida la estructura. A mayor número de fisuras, mayor intensidad de corrosión en el hormigón armado. Un dato por destacar, en este caso, es la importancia del revestimiento de hormigón para reducir este proceso. Asimismo, este espesor puede ser un factor tan importante en este contexto como la incidencia de fisuras en la propia estructura. Por ello, se presta atención a la importancia de los estudios sobre el revestimiento del hormigón, lo que permite obtener información relevante que contribuya a la producción de hormigón duradero.

En cuanto al período de curado adoptado, Thomaz (2005) encontró que el tiempo de curado húmedo de 7 días es suficiente para que el hormigón adquiera las propiedades deseadas, sin embargo, este período depende del tipo de cemento y de la relación agua / cemento utilizada. Sin embargo, cuando se utilizan cementos con adiciones minerales es necesario un mayor tiempo de

curado, como es el caso del cemento con escoria de alto horno, en el que su proceso de hidratación es más lento que el cemento ordinario (Çakir; Akoz, 2006; Furnas, 1997; Thomaz, 2005). También se observa en estudios como el de Castro (2003) y Braun (2003) que los cementos con mayor contenido de adición, como el CP III 32, requieren un período de curado más largo, en comparación con otros tipos de cementos.

3.2 Evaluación de la microestructura

A los seis meses de edad, solo se seleccionaron dos tipos de muestras para las pruebas de microestructura. Estas muestras se tomaron de la región de tracción de los modelos de prueba prismáticos sin carga (SC) y se sometieron a Carga Central Permanente (CCP). Ambos estuvieron en curado húmedo durante 7 días antes de someterlos a cargas. La figura 9 muestra una muestra sin cargar.

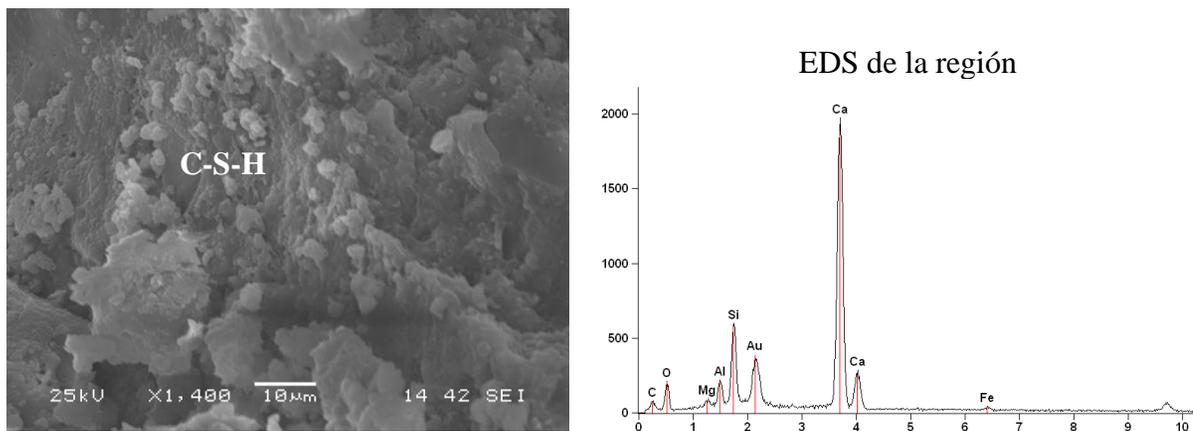


Figura 9. Concreto sometido a curado húmedo, sin carga, a los seis meses de edad.

En la figura 9 se muestra un área con morfología densa y amorfa (C-S-H Tipo III o IV), que es más común en este caso porque se trata de muestras de edades más avanzadas. Cheng et al (2005) observaron en las micrografías de concreto con diferentes niveles de escoria de alto horno en altos porcentajes, una estructura más densa, con pocas agujas de etringita y con poros capilares menores a 50 nm, que pueden haber sido rellenados con productos como C-S-H. El pico de Au que apareció en el EDS en la región de la Figura 9 puede deberse a la metalización con oro.

La fase C-S-H ocupa un volumen de 50% a 60% de sólidos de la pasta de cemento, siendo la principal responsable de las propiedades de la pasta, como la resistencia a la compresión axial. Su estructura depende de la temperatura y del espacio libre en la mezcla para su hidratación (Baroghel-Bouny, 1994; Irassar, 2004). Esta fase se puede encontrar en las siguientes morfologías: Tipo I - fibroso, generalmente en forma de "erizo", cuando la hidratación se está desarrollando (edades tempranas) a partir del grano C_3S con suficiente espacio disponible; Tipo II: alveolar o reticulado, también llamado "panal de abeja", que se presenta junto con C-S-H Tipo I; Tipo III y IV - prominente en edades más avanzadas, constituye una morfología densa y amorfa, difícil de definir y puede constituir una buena parte del total de productos hidratados. Los productos característicos en etapas más avanzadas de hidratación son C-S-H tipo III y IV y más $Ca(OH)_2$ (Taylor, 1997; Ghosh, 2002).

Según Kurdowski (2014) existen 4 formas morfológicas de la fase C-S-H: fibrosa, en malla, partículas isométricas y conglomerados esféricos, pertenecientes al C-S-H interno e identificadas como un gel firme bajo un microscopio electrónico.

La Figura 10 muestra la microestructura del hormigón sometido a carga central permanente en curado húmedo durante 7 días, a los seis meses de edad y la Figura 11 muestra el microanálisis en tres puntos de este mismo hormigón.

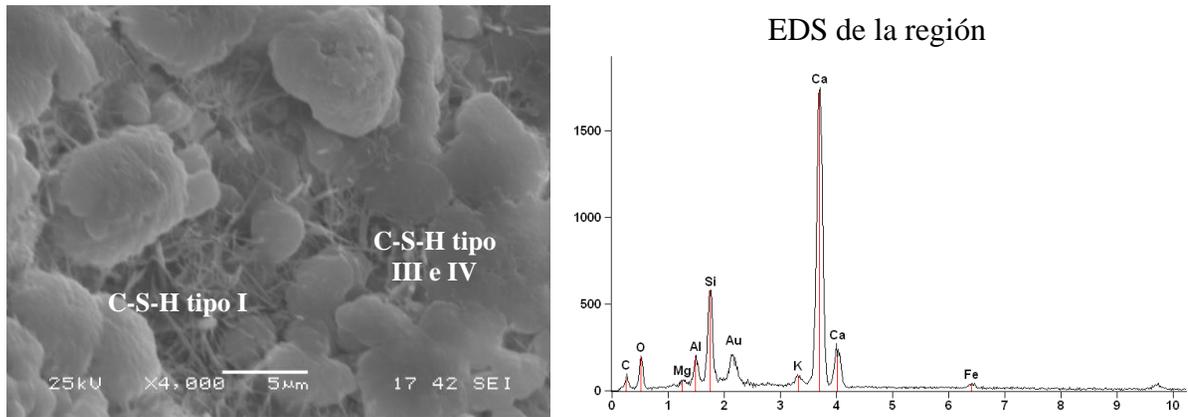


Figura 10. Concreto sometido a curado húmedo durante 7 días y carga central permanente, a los seis meses de edad.

En la imagen de la Figura 10 se observan algunas agujas, pero en el EDS el elemento azufre (S) no está presente para configurar una Etringita. En este caso, pueden ser agujas de C-S-H, con morfología fibrilar (Tipo I) (Taylor, 1997; Ghosh, 2002). También se observan las fases C-S-H tipo III y tipo IV.

En mezclas que utilizan cemento de alto horno, la morfología fibrilar C-S-H del cemento Portland sin adiciones (clinker Portland) se reemplaza gradualmente por una morfología diferente, que Richardson (1999) denomina “hoja” o “tipo hoja”. Este autor informa que este cambio en la morfología es responsable del mejor desempeño y mayor durabilidad de las mezclas con esta adición. Morfologías aún no observadas a la edad de 6 meses de prueba.

La Figura 11 muestra tres puntos seleccionados del concreto sometidos a curado húmedo durante 7 días y carga central permanente. En la composición elemental por la EDS de los tres puntos se encuentran los mismos elementos Ca, Si, Al y Mg.

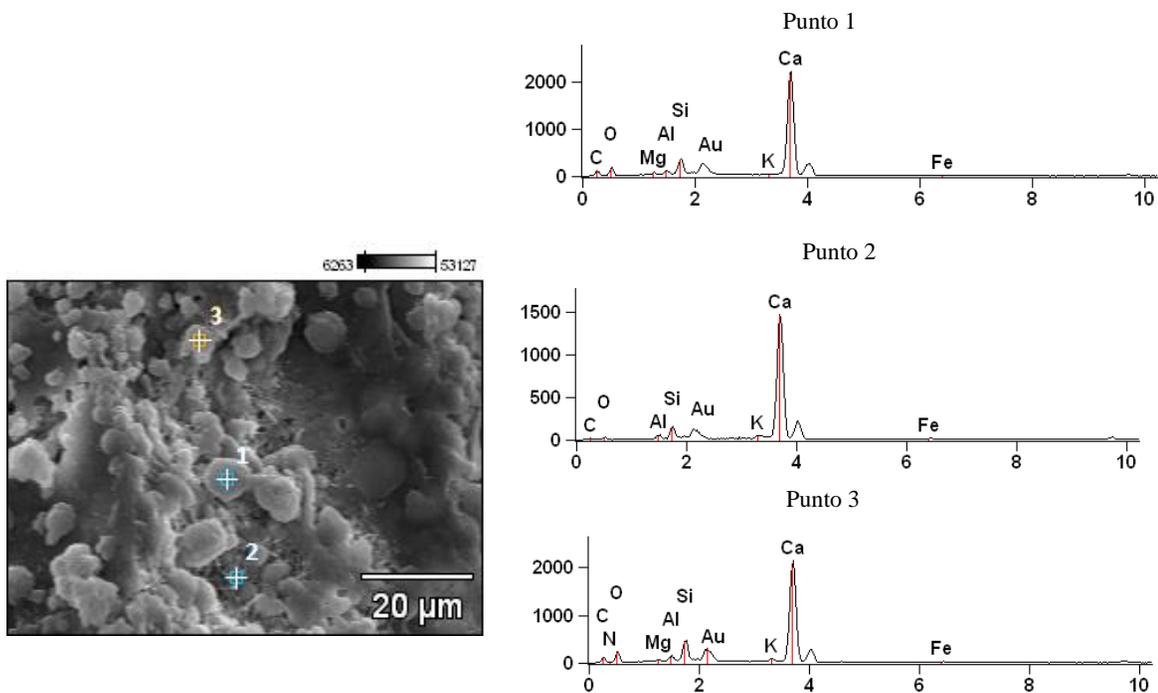


Figura 11. Microanálisis EDS en tres puntos del hormigón bajo carga central permanente (CCP).

En el microanálisis se detectó la presencia de los elementos Ca, K, Si, Al, Mg, O y C, propios de los productos de hidratación del cemento.

El C-S-H resultante de la hidratación del cemento Portland y la escoria de alto horno tienen morfologías similares; sin embargo, el grano de escoria tiene altos porcentajes de Mg y Al (Richardson, 1999).

En la Figura 12 se muestra la micrografía de una muestra de hormigón sin carga, sometida a curado húmedo durante 7 días, a los 24 meses de edad.

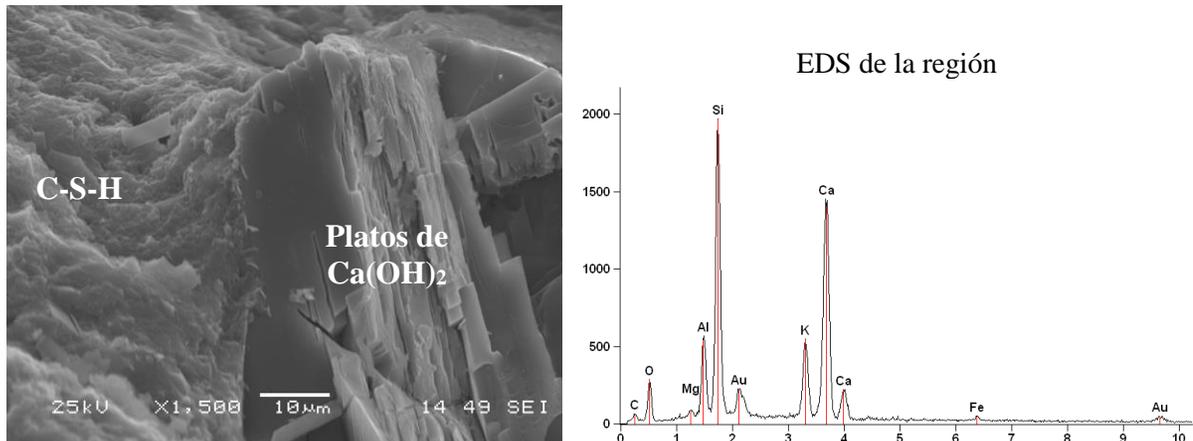


Figura 12. Micrografía y microanálisis de la muestra de hormigón descargada, a los 24 meses de edad.

La Figura 12 muestra la presencia de posibles placas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H. Como verifican Baroghel-Bouny (1994) Mehta y Monteiro (2008), la fase correspondiente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mantiene la alta alcalinidad del sistema, preservando la estabilidad del C-S-H y del recubrimiento de hormigón.

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ocupa un volumen de sólidos del 20% al 25% en la pasta de cemento hidratada. Por su composición con estequiometría definida, se forman en grandes cristales con morfología prismática hexagonal. Esta morfología también puede variar en función de la temperatura de hidratación y las impurezas presentes. Debido a estos factores, se pueden formar montones de grandes placas.

Esta fase mantiene la alta alcalinidad del sistema, preservando la estabilidad del C-S-H y la capa de recubrimiento del refuerzo (Baroghuel-Bouny, 1994; Castro, 2003).

La Figura 13 muestra las micrografías y EDS del hormigón sometido a carga central de corta duración, a los 24 meses de edad.

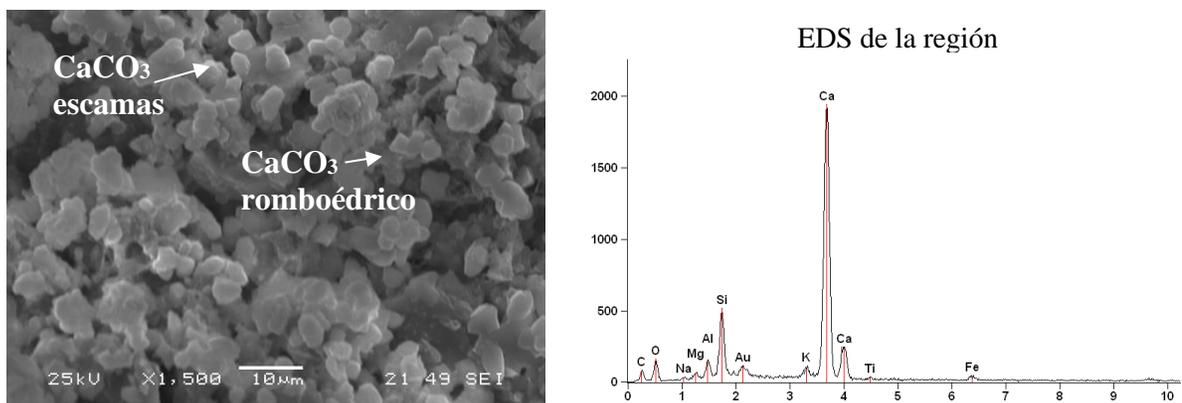


Figura 13 - Micrografía y microanálisis de la muestra de hormigón sometida a carga central de corta duración, a los 24 meses de edad.

En la Figura 13 se puede observar la formación de carbonato cálcico en forma de cristales romboédricos y en forma de escamas, sobre un C-S-H poroso y posiblemente carbonatado. Se observa en los compuestos hidratados formados, la presencia de carbonato cálcico (CaCO_3), con diferentes morfologías en C-S-H, que también puede estar en proceso de modificación por la acción del tiempo, y debido a su porosidad. La fase porosa C-S-H y la formación de CaCO_3 indicada en la Figura 13 también fue observada por Sakar et al (2001) en su estudio, con CaCO_3 en forma de escamas, sin embargo, en grandes cantidades.

Las sales disueltas en el agua de mar son principalmente cloruros y sulfatos. En el caso de los iones de cloruros (Cl^-), al entrar en contacto con alúmina, el monocloroaluminato cristaliza en forma de placas hexagonales inestables. El cloruro entra en la red cristalina de silicatos hidratados (C-S-H) y transforma las fibras en redes reticuladas, haciendo esta fase más porosa. Regourd et al (1980) también observaron la presencia de CaCO_3 en micrografías de muestras de concreto (compuestos hidratados de cemento Portland) expuestas a niebla salina.

La Figura 14 muestra la micrografía y microanálisis del hormigón sometido a carga central permanente (CCP), a los 24 meses de edad.

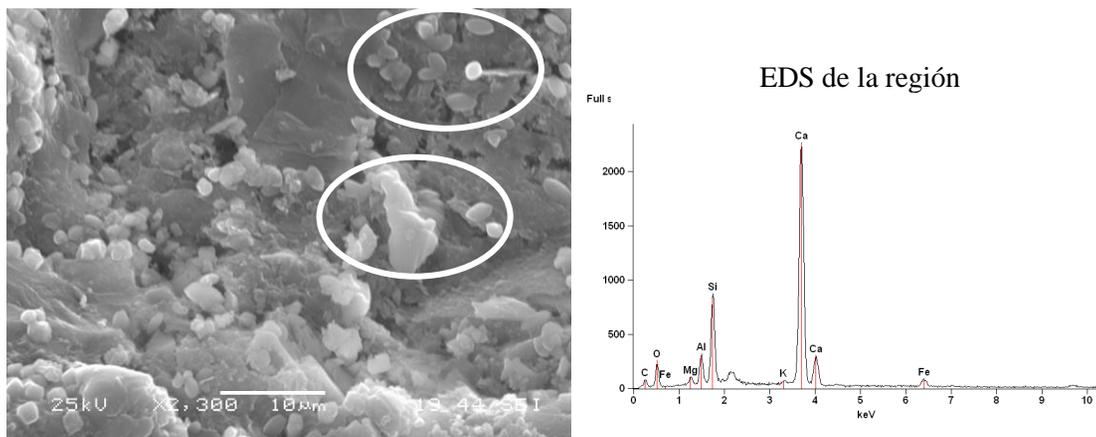


Figura 14 - Micrografías y microanálisis de hormigón con carga central permanente.

La muestra de la Figura 14 muestra un área con una microestructura más densa, con diferentes morfologías de CaCO_3 ; sin embargo, algunos productos que llamaron la atención, y que se destacan en esta micrografía. Por su morfología, pueden configurar materia orgánica, probablemente microorganismos (RIBAS SILVA, 1996). Sin embargo, para confirmar esta hipótesis sería necesario un análisis microbiológico, el cual no se realizó por no ser objeto de este estudio. En este caso, la fisura inducida por carga pudo haber provocado la entrada de estos microorganismos, ya que no se observaron en el hormigón SC y CCCD.

Al comparar las micrografías, en cuanto a las cargas CCCD y CCP y sin carga (SC), se observa que la muestra con mayor compacidad y menor cantidad de poros es la referencia (SC). En cuanto a los compuestos formados, la fase carbonatada C-S-H se puede ver en las micrografías de hormigón CCCD. Cuando se somete a una carga central permanente, la fase C-S-H es densa con la formación de microorganismos, y la porosidad en este caso no es alta, probablemente debido al curado húmedo a los 7 días. Y en el hormigón de referencia (SC) se encuentra la formación de Ca(OH)_2 , así como la fase C-S-H densa y homogénea. Así, se observa la influencia de las fisuras en la durabilidad del material, ya que en el hormigón con las placas de Ca(OH)_2 existe una mayor alcalinidad del sistema y la preservación de la fase CSH, como consecuencia, de la capa de recubrimiento (Baroghel-Bouny, 1994; Mehta, Monteiro; 2008).

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de la penetración de cloruros, se observó que la apertura de la fisura no influyó en la entrada de iones cloruro a la estructura, sin diferencias significativas entre los tipos de carga y el hormigón de referencia (sin carga).

Los estudios realizados en Europa sobre el tema utilizan periodos más prolongados de exposición al medio exterior para obtener resultados más expresivos sobre el comportamiento de la fisura en la penetración de iones cloruro en el hormigón. En este sentido se ve que para el hormigón estudiado sería necesario un período mayor para que haya resultados más significativos entre los tipos de carga y sin carga. Algunos factores también pueden haber contribuido a este resultado, destacando en este caso el uso de cemento con la adición de escoria de alto horno, que es más resistente al ataque de cloruros, en comparación con el CO₂. La niebla salina utilizada tampoco parece haber contribuido lo suficiente como para que pudieran existir diferencias entre los tipos de carga y sin carga.

Al comparar las tolerancias de apertura de fisuras de la norma brasileña con las normas internacionales, parece que las aberturas permitidas para la norma brasileña son más grandes. A pesar de que las condiciones climáticas en Europa, por ejemplo, son bastante diferentes a las de Brasil donde hay variaciones de temperatura que van desde -5°C a 30°C como es el caso en Francia y en Brasil hay variaciones que oscilan alrededor de 20°C a 35°C sin embargo, se puede ver que el control tecnológico de calidad de materiales y ejecución en Brasil tiende a ser menos riguroso, con esto las aberturas de fisuras pueden ser un agravante en este contexto. Por otro lado, se observa en este estudio que en situaciones climáticas brasileñas, hasta la edad de dos años, no hubo diferencias significativas entre los resultados de las muestras bajo la condición de carga determinada en este estudio (referencia) es decir, sin cargar.

Hasta los 12 meses de edad, se observó la formación de productos de hidratación del cemento en micrografías y microanálisis, principalmente encontrados en las fases de C-S-H, además de cristales de Ca(OH)₂, agujas de etringita y C-S-H y granos de escoria de diferentes dimensiones. Los productos de deterioro (CaCO₃ y C-S-H carbonatados) se encontraron después de los 18 meses de edad, en situaciones de carga y curado. Sin embargo, solo a los 24 meses es más evidente que en el hormigón sometido a los tipos de carga (CCP y CCCD) se observó la presencia de CaCO₃ y C-S-H carbonatada y en la muestra sin carga, se encontraron solo fases de C-S-H y Ca(OH)₂. Sin embargo, en el hormigón con apertura de fisura (CCP) se encontraron posibles microorganismos, los cuales pudieron haber ingresado por la fisura.

Desde el punto de vista microestructural se observó que a los 24 meses la carga influyó en los resultados de las muestras estudiadas, ya que en el hormigón con apertura de fisura se visualizó en el microscopio la presencia de microorganismos en las muestras sometidas a carga permanente. Estos compuestos solo se encontraron en hormigón con apertura de fisuras (en carga central permanente). En este sentido, se ve que la fisura pudo haber sido una vía de entrada de estos microorganismos, lo que puede tener consecuencias en la durabilidad, como se verifica en la literatura.

Así, se observa que la fisura (cuando está constantemente abierta) puede influir en la microestructura del hormigón a lo largo del tiempo, creando un camino preferencialmente para la entrada de agentes agresivos y microorganismos. Este hecho no se observó en hormigón con carga de corta duración y sin carga.

5. REFERENCIAS

ACI – American Concrete Institute (2016). *Standard practice for curing concrete. ACI 308-2016*. ACI Committee 308, 2016.

- Alexander, M. G., Mackechnie, J. R., Ballim, Y. (2001), *Use of durability indexes do achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures*. Materials science of concrete VI. Ed. By Sidney Mindess, Jan Skalny. Published by American Ceramic Society.
- Andrade, T. (2005), *Tópicos de durabilidade do concreto*. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 753-792.
- Arya, C., Ofori-Darko, F. K. (1996). *Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete*. Cement and Concrete Research, v.26, No. 3, p. 345-353, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85022-8)
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2020). *NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Baroghel-Bouny, V. (1994), *Caractérisation des patês de ciment et des bétons – Méthodes, analyses, interpretations*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, IST – Section des publications.
- Braun, V. (2003), “*Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos*”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás – UFG.
- Çakir, Ö., Aköz, F. (2006), *Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.013>
- Cascudo, O. (2005), “*Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura*”. In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 985-1016.
- Cascudo, O. (1997), *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG.
- Castro, A. (2003), *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação*. Dissertação de mestrado, Universidade de Goiás.
- Cheng, A., Huang, R., Wu, J., Chen, C. (2005), Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. *Materials Chemistry and Physics*, v. 93, p. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.03.043>
- Crauss, C. (2010), *Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria-RS.
- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., Machado, G. (2007), *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras - materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60 p.
- Figueiredo, C. R., Nepomuceno, A. A. (2004), *Influência da absorção na carbonatação de estruturas de concreto in loco*. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis. Anais... São Paulo: IBRACON, v. 1.
- Figueiredo, E. P. (2005), “*Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto*. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*”. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, Volume 2. p. 829-856.
- Fortes, L. C., Andrade, J. C. (1995), *Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação*. ASTEF - Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo de Frontin. URL: http://www.electus.com.br/usuarios/lyttelto/InfluAgClorCarb/Influ_index.htm
- François, R., Castel, A., Vidal, T., Vu, N. A. (2006), *Long term corrosion behavior of reinforced concrete structures in chloride environment*. *J. Phys. IV France* 136, 285–293. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006136029>

- Furnas, E. L. C. (1997), *Concreto massa estrutural projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo: Pini.
- Ghali, A., Favre, R. (1994), “*Concrete Structures: Stresses and Deformations*”. E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, second edition.
- Ghosh, S. N. (2002), “*Advances in cement technology: Chemistry, Manufacture and Testing*”. Second Edition, published by Tech Books International, New Delhi, India.
- Hearn, N., Figg, J. (2001), *Transport mechanisms and damage: Current issues in permeation characteristics of concrete*. Materials science of concrete. Ed. By Jan Skalny, American Ceramic Society. v. VI, p.327-376.
- Helene, P. R. L. (1997), *Vida útil das estruturas de concreto armado*. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. VI Congresso de Controle de Qualidade – COMPAT 97. Anais... Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil – UFRS, p. 1-30.
- Helene, P., Diniz, J. Z. (2001), *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. 43º Congresso Brasileiro de Concreto. Curso de durabilidade. 18 a 23 de agosto de 2001, Foz do Iguaçu – PR.
- Helmuth, R., Stark, D. (1992), *Alkali-silica reactivity mechanisms*. Materials Science of Concrete III. Ed. By Jan Skalny. American Ceramic Society, USA.
- Illston, J. M. (1994), *Construction Materials – Their nature and behaviour*. 2ª ed. London – UK: E & FN SPON, 518p.
- Irassar, E. (2004), *Hormigón: Naturaleza y Propiedades. Hormigones Especiales – XV. Reunión Técnica Ing. Marcelo Wainsztein, Asociación Argentina de Tecnología del hormigón*. Santa Fe, 21 al 24 de octubre de 2004.
- Ismail, M., Gagné, R., François, R., Toumi, A. (2006), *Measurement and modeling of gas transfer in cracked mortars*. Materials and Structures, v. 39, p. 43–52, <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9025-4>
- Jucá, T. R. P. (2002), “*Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*”. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil.
- Khatib, J. M., Hibbert, J. J. (2005), *Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin*. Construction and Building Materials, v. 19 460–472, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017>
- Kim, M. Y., Yang, E. I., Yi, S. T. (2013), *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 239-245, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.084>
- Konin, A., Franfois, R., Arliguie, G. (1998), *Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 31, p. 27-35, <https://doi.org/10.1007/BF02486411>
- Lawrence, C. D. (2006), *Physicochemical and Mechanical Properties of Portland Cements. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*. Ed. By Peter C Hewlett. Elsevier Butterworth Heinemann, USA.
- Martins, A. R. (2001), *Efeito da cura térmica e de cimento com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento*. Dissertação mestrado, Universidade Estadual de Campinas-SP.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. 3ª Edição, São Paulo: IBRACON.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 751 p.
- Midness, S., Young, J. F. (1981), *Concrete*. Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New Jersey – USA.
- Montgomery, D. C. (1991), *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons.

- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015), *Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte*. Revista ALCONPAT, 5(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Ribas Silva, M. (1996), *Climates and biodeterioration of concrete. Durability of building materials & components 7. Volume one – Prediction, degradation & materials*. Edited by Christer Sjostrom. Published by E & FN Spon. Chapman & Hall, London, UK.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Sarkar, S. L., Aimin, X., Jana, D. (2001), *Scanning Electron Microscopy, X-Ray microanalysis of concrete. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, techniques and applications*. Construction and Building Materials, USA, Ed. By V. S. RAMACHANDRAN, J. J BEAUDOIN.
- Taylor, H. F. W. (1997), “*Cement Chemistry*”. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174.
- Vidal, T., Castel, A., François, R. (2007), *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. Cement and Concrete Research, 37 (11), p. 1551–1561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Regourd, M. (1980), *Structure and behavior of slag Portland cement hidrates*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7Th. Proceedings. Paris.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Romano, F. S. (2009), *Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS.
- Silvestro, L., Romano, F. S., Dal Molin, D. C. C. (2021), *Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 101-118, <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100496>
- Song, H., Lee, C., Ann, K. Y. (2008), *Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments*. Cement & Concrete Composites. v. 30, p. 113–121, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Taylor, H. F. W. (1997), *Cement Chemistry*. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Thomaz, E. (2005), *Execução, controle e desempenho das estruturas de concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v, volume 1. p. 527-582.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00246-1)
- Vidal, T., Castel, A. François, R. (2007), *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. Cement and Concrete Research, v. 37, p. 1551–1561, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Kurdowski, W. (2014), *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, Dordrecht, <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Hai-Long, W., Jian-Guo, D., Xiao-Yan, S., Xiao-Long Z. (2016), *Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.002>