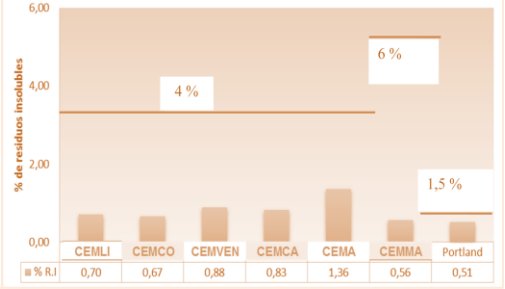
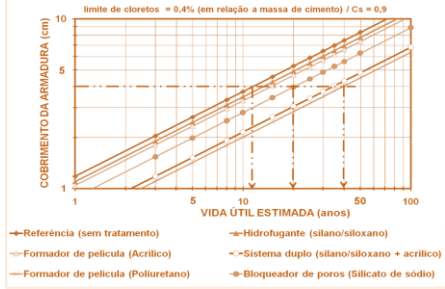
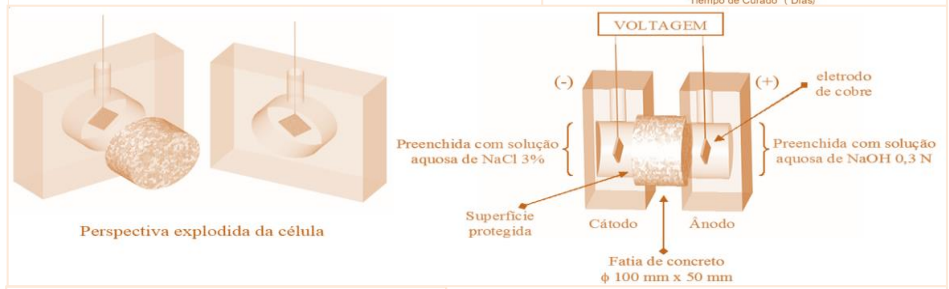
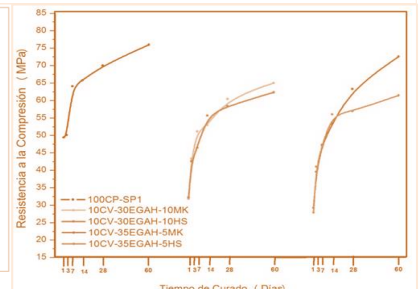
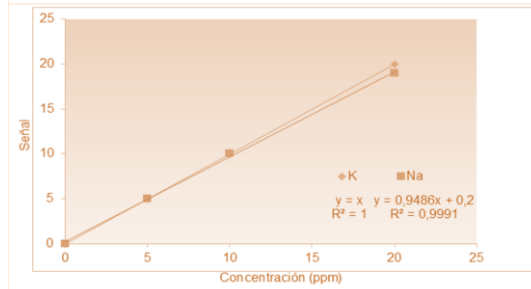
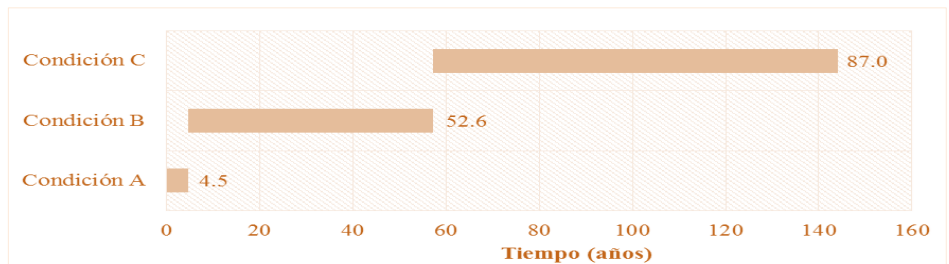
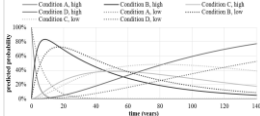
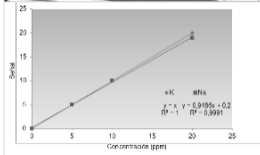
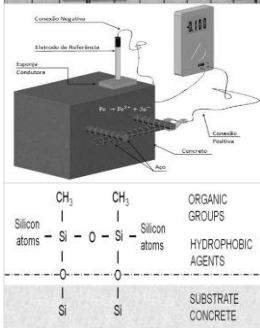


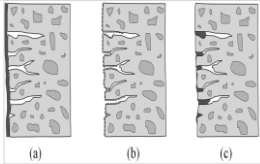
eISSN: 2007-6835

Volumen 5

Septiembre – Diciembre 2015

Número 3

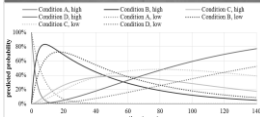
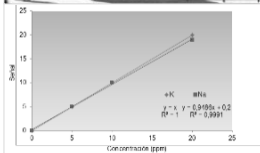
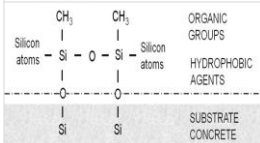
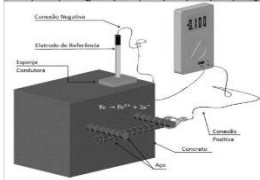




CONTENIDO

Página

- A. Silva, J. de Brito, P. L. Gaspar, L. C. Neves:** Análisis probabilístico de la evolución de la degradación de revestimientos en piedra con utilización de cadenas de Markov. 162
- S. H., Lopes da Silva, C., Londero, M. H. F., Medeiros, V. C. O., Pereira, E. C. B., Monteiro:** Elección del tipo de cemento capaz de proteger al concreto de la corrosión de las armaduras sobre la acción de iones cloruros a través del análisis jerárquico. 174
- H. Bolognini, N. Martínez, O. Troconis de Rincón:** Caracterización química y físico-mecánica de cementos adicionados de filer calizo en Venezuela. 190
- L. Y. Gómez-Zamorano, G. García-Guillén, J. L. Acevedo-Dávila:** Estudio de la hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín: efecto del empleo de dos aditivos superplastificantes. 204
- M. H. F. Medeiros, L. V. Real, V. A. Quarcioni, P. Helene:** Concreto con protección superficial expuesto a solución de cloruros: espesor equivalente de recubrimiento. 218
- Artículo de Revisión:**
- W. Martínez-Molina, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso Guzmán, H. L. Chávez-García, H. Hernández-Barrios, C. Lara Gómez, W. Martínez-Alonso, J. T. Pérez-Quiroz, J. A. Bedolla Arroyo, F. M. González-Valdéz:** Concreto reciclado: una revisión. 233



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

Luis Carlos Pinto Da Silva, **Brasil**

Presidente

Paulo Do Lago Helene, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Manuel Mendoza Rangel, **México**

Vicepresidente Administrativo

Ysabel Dykdan Jaua, **Venezuela**

Vicepresidente Académico

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Gestor

Enrique Aguilar Cervera, **México**

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:

Dra. Patricia Martínez
Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

Editor Ejecutivo:

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

Mensaje del Editor en Jefe

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

<http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el tercer y último número de nuestro quinto año al aire.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de casos de estudio relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones motivando desde luego la presentación de investigaciones básicas o aplicadas que pudiesen tener aplicación con los casos de estudio.

En este V5N3, iniciamos con nuestro artículo procedente de **Portugal y Reino Unido**. A. Silva y colegas discuten sobre los modelos de predicción de la vida útil donde extrapolan datos para conocer el comportamiento futuro de los elementos de construcción, anticipando el punto en el que se requiere la intervención. Este estudio también permite comprender la influencia de las condiciones de exposición en la evolución de la degradación de los revestimientos.

En el segundo trabajo, S. H., Lopes da Silva y sus colegas de **Brasil** discuten combinaciones de tipos de cementos para obtener el que tiene mayor capacidad para proteger al refuerzo del concreto de la corrosión inducida por cloruros. Para ésto se apoya del método de Análisis Jerárquico el cual fué eficaz en la selección del tipo de cemento.

En el tercer artículo proveniente de **Venezuela**, Humberto Bolognini y colegas comentan que en los últimos años en Venezuela, se ha presentado una crisis sobre la demanda, comercialización y producción del cemento, principal material de construcción. En este trabajo se presenta la caracterización química y físico- mecánica realizada a las principales marcas comerciales de cementos adicionados en aquel país, caracterizándolos de acuerdo a: composición química, finura Blaine, tiempo de fraguado y resistencia mecánica a compresión. Los resultados demuestran que estos cementos no cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la norma venezolana para su uso en la elaboración de concreto estructural.

El cuarto artículo viene de **México**, Lauren Y. Gómez Zamorano y colegas presentan un trabajo de investigación que se enfocó en la evaluación del efecto que tienen

diferentes materiales de reemplazo y dos aditivos superplastificantes en el desarrollo de las propiedades mecánicas, formación de fases y en la evolución del calor de hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas hasta un 60%. Con base a los resultados se confirmó que con el uso de materiales de reemplazo, se redujo la cantidad de hidróxido de calcio, debido a la reacción puzolánica y se incrementó la resistencia a la compresión.

El quinto trabajo de este número lo escriben Marcelo Medeiros y sus colegas de **Brasil**, analizan las contribuciones relativas de tres métodos de protección de la superficie del concreto sobre la eficiencia de los tratamientos de superficie en la inhibición de la penetración de los iones cloruro. Algunos resultados indicaron que un concreto con determinado tipo de protección puede aumentar el tiempo de contaminación hasta tres veces.

El sexto artículo es una revisión del Estado del Arte que proviene de **México**, donde Elia Alonso Guzmán y colegas discuten como la generación de residuos sólidos de concreto hidráulico, considerados como desecho, está convirtiéndose en un problema medioambiental. La elaboración de concreto reciclado se enfrenta a la búsqueda de diseños óptimos para lograr el mayor desempeño mecánico bajo sollicitaciones estáticas y dinámicas. En este trabajo se hace una revisión de los avances internacionales en esta temática.

Cada número de RA busca balancear la participación de temas afines al objeto social de la ALCONPAT Internacional.

Agradecemos a nuestros autores de este número su voluntad y esfuerzo para cumplir con la calidad y tiempos establecidos.

Cada número de la revista aparecerá con los artículos en su idioma original, y antes del siguiente número se darán de alta las versiones en los demás idiomas. Los idiomas oficiales de la Revista ALCONPAT son Inglés, Español y Portugués

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



Análisis probabilística de la evolución de la degradación de revestimientos en piedra con utilización de cadenas de Markov

A. Silva¹, J. de Brito¹, P. L. Gaspar², L. C. Neves³

¹Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, IST, Universidade de Lisboa, e-mail: anasilva931@msn.com

²Faculdade de Arquitectura, Universidade de Lisboa

³NTEC, University of Nottingham

Información del artículo

Artículo recibido el 16 de Marzo de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 18 de agosto de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

RESUMEN

Los modelos de predicción de la vida útil intentan extrapolar el comportamiento futuro de los elementos de construcción, anticipando el punto en el que se requiere la intervención. Cadenas de Markov se pueden usar para evaluar la condición futura de los elementos de construcción y se utilizan en este estudio para modelar la vida útil de revestimientos pétreos, a partir de las inspecciones visuales de edificios en servicio. La degradación de los revestimientos pétreos se califica en una escala discreta de cinco niveles, y se evalúa la probabilidad de transición de condiciones de degradación. Este estudio también permite comprender la influencia de las condiciones de exposición en la evolución de la degradación de los revestimientos.

Palabras clave: Cadenas de Markov; predicción de la vida útil; revestimientos pétreos.

RESUMO

Os modelos de previsão de vida útil procuram extrapolar o comportamento futuro dos elementos construtivos, antevendo o momento a partir do qual é necessário intervir. As cadeias de Markov permitem avaliar a condição futura dos elementos da construção, sendo utilizadas no presente estudo, na modelação da previsão da vida útil de revestimentos pétreos (fixados directamente ao suporte), a partir de inspeções visuais de edifícios em serviço. A degradação dos revestimentos pétreos é classificada numa escala discreta composta por cinco níveis, sendo avaliada a probabilidade de transição entre condições de degradação e o tempo de permanência em cada uma dessas condições. O presente estudo permite ainda compreender a influência das condições de exposição na evolução da degradação deste tipo de revestimentos.

Palavras-chave: cadeias de Markov; previsão da vida útil; revestimentos pétreos.

ABSTRACT

The service life prediction models intend to extrapolate the future behaviour of building elements, anticipating the instant at which an intervention is required. Markov chains can be used to assess the future condition of the construction components and are applied in this study to model the service life of stone claddings (directly adhered to the substrate), based on visual inspections of buildings in service conditions. The degradation of stone claddings is evaluated using a discrete scale with five condition levels. In this study the probability of transition from degradation conditions and the time spent in each of these conditions are evaluated. This study also allows a better understanding of the influence of the exposure conditions on the evolution of degradation of the claddings under analysis.

Keywords: Markov chains; service life prediction; stone claddings.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito

1. INTRODUCCIÓN

La degradación es un proceso complejo y dinámico, en lo que los agentes y mecanismos de degradación actúan en sinergia y se encuentran en constante cambio. Los estados actual y futuro de las construcciones presentan grados distintos de incertidumbre. Para intentar superar esta dificultad, a veces es necesario recurrir a un abordaje estocástico en la previsión de la vida útil (Frangopol et al., 2004). En general, este tipo de abordaje conlleva una complejidad elevada y parte de la premisa de que la deterioración es un proceso regido por variables aleatorias (Moser, 2003). Así, se puede mirar a la degradación como un proceso continuo de pérdida de desempeño, que evoluciona de forma probabilística en el tiempo. El fenómeno de degradación puede aún ser descrito como la transición entre estados de condición, caracterizados por diferentes niveles de degradación (Basso et al., 2012). Las cadenas de Markov son uno de los métodos que permiten evaluar, de modo estocástico, la condición futura de los revestimientos de fachada. Las cadenas de Markov simulan la evolución de la degradación de las construcciones y permiten definir la probabilidad de desempeño futuro de un elemento de la construcción con base tan solo en su desempeño actual, ignorando la historia de deterioración y de mantenimiento del elemento, su edad, además de otros parámetros (Neves et al., 2006).

En este estudio, se aplica a la previsión de la vida útil de revestimientos pétreos un modelo basado en las cadenas de Markov, permitiendo el análisis de la distribución probabilística de cada una de las condiciones de degradación en el tiempo (y también el tiempo mediano de permanencia en cada condición de degradación). Además, es analizada la influencia de algunas características de los revestimientos en la evolución de su proceso de degradación. Este tipo de modelo es crucial en el ámbito del mantenimiento del patrimonio construido, porque fornece datos relativos al más probable instante en el que fallan los revestimientos, función de sus características y de la edad en la que es extremadamente improbable la rotura de estos elementos, englobando la noción de riesgo asociada al fallo de los revestimientos, posibilitando de este modo una definición informada de los planos de mantenimiento y de los periodos de garantía y de cobertura de danos por parte de las aseguradoras.

2. DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMENTOS PÉTREOS

Las cadenas de Markov se basan en un conjunto de estados discretos que caracterizan el desempeño de las construcciones. Existen distintos métodos para la evaluación del estado de degradación de los edificios y de sus componentes, que varían según la jerarquía de los elementos de la construcción y la definición de parámetros de condición asociados a los fallos (Straub, 2003). Diversos autores han establecido sistemas de clasificación de las anomalías o escalas de degradación para expresar la degradación visual y funcional de los elementos analizados (Balaras et al., 2005; Shohet et al., 1999); en estos sistemas se incluye la clasificación de los fallos a través de una escala de variables discretas, desde el nivel de condición más favorable (situaciones de ausencia de degradación visible) hasta la situación más desfavorable (degradación extensa o pérdida de funcionalidad). En el presente estudio, ha sido adoptada una escala con 5 niveles de degradación (entre la condición A – sin degradación visible – y la condición E – degradación generalizada). Esta clasificación relaciona el estado de degradación de los revestimientos en piedra y la evaluación física y visual de las fachadas en el momento de la inspección (“Tabla 1”).

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este estudio, han sido inspeccionados 203 revestimientos en piedra natural (con fijación directa al soporte) en condiciones reales de utilización. Para tal, se han hecho solamente inspecciones visuales, evaluando *in situ* las características de los revestimientos, su estado de conservación (según la escala presentada en la Tabla 1, que atribuye a los revestimientos inspeccionados un dado nivel de degradación, función del área del revestimiento afectada y del tipo de anomalía), de sus características de exposición ambiental y de las condiciones de mantenimiento. La muestra analizada contiene edificios de los siglos XIX y XX, destinados a distintos usos: habitacionales, comercio o servicios. La muestra ha sido seleccionada de modo aleatorio; sin embargo se ha buscado una muestra coherente y representativa del tipo de piedra natural presente en los revestimientos existentes en Portugal. A demás, la muestra obtenida presenta un largo abanico de edades, en el que el edificio más reciente tiene solamente 1 año y el edificio más antiguo tiene 82 años, lo que permite evaluar con más rigor el proceso de envejecimiento y degradación de los elementos analizados. En el presente estudio, se asume que la edad es obtenida según el período de tiempo que transcurre desde la última reparación hasta la fecha de la inspección (ya que una intervención en el revestimiento deberá reponer las características iniciales, reempezando así su proceso de degradación, desde el punto de vista de los modelos de previsión de vida útil). En esta muestra, ninguno de los casos estudiados pertenece a la condición de degradación más desfavorable (condición E). La “Figura 1” ilustra las distintas condiciones de degradación caracterizadas en la Tabla 1.



Figura 1. Condiciones de degradación de los revestimientos pétreos

Tabla 1. Niveles de degradación de los revestimientos en piedra natural

Degradación física y visual	Condición de degradación
No presenta degradación visible	Condición A
Anomalías visuales o de degradación superficial $\leq 15\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición B
Anomalías visuales o de degradación superficial $\leq 30\%$ Anomalías en juntas $\leq 30\%$ Fallos en la fijación al soporte $\leq 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición C
Anomalías visuales o de degradación superficial $> 30\%$ Anomalías en juntas $> 30\%$ Fallos en la fijación al soporte $> 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición D
Fallos en la fijación al soporte $> 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $> 20\%$	Condición E

4. ANÁLISIS PROBABILÍSTICA DE LA DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS PÉTREOS EN EL TIEMPO

En este estudio, se usa la función *fmincon* (*constrained nonlinear optimization*) presente en el *software* MATLAB para obtener la matriz intensidad (Q), que permite obtener la transición entre estados de degradación, acorde el estado original y la tasa de transición entre el estado actual y el estado futuro. Con base en las tasas de transición entre condiciones de degradación, la probabilidad de transición entre estados de degradación puede ser obtenida a través de la ecuación diferencial de Chapman-Kolmogorov. La matriz de intensidad es obtenida a través de la maximización del algoritmo de verosimilitud (Carrington et al., 2005), tal como se presenta en la ecuación (1), siendo para tal utilizado en este estudio el algoritmo numérico de conjunto activo (*active-set numerical algorithm*, presente en la función *fmincon*) (Kalbfleisch e Lawless, 1985). Con el objetivo de mejorar la estabilidad del algoritmo de optimización, se maximiza el algoritmo de verosimilitud (Fletcher e Powell, 1963; Higham e Higham, 2005), como representado en la ecuación (1). La matriz Q obtenida para los revestimientos en piedra es dada por la ecuación (2).

$$Find \theta \xrightarrow{\text{maximize}} \log(L(Q)) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \log(P_{ij}^{\Delta t}) \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_{A,B} \\ q_{B,C} \\ q_{C,D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2210 \\ 0,0190 \\ 0,0115 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A través de la matriz intensidad (Q) es posible estimar el tiempo de permanencia en cada estado de degradación (“Figura 2”). Los revestimientos en piedra transitan con más rapidez entre estados de condición más favorables. Este resultado está directamente relacionado con la definición de los estados de degradación. Es normal que la transición entre estados de degradación no se haga de modo uniforme, ya que los estados de condición siguen una escala que tampoco es constante. La condición A de degradación (más leve) corresponde a un revestimiento pétreo sin apenas deterioración y, por tanto, para que un revestimiento en piedra transite para lo siguiente nivel basta con que presente cambios en la uniformidad de la superficie o manchas puntuales. Parece por eso razonable que la transición de la condición A para la siguiente condición ocurra en media en solamente 4,5 años.

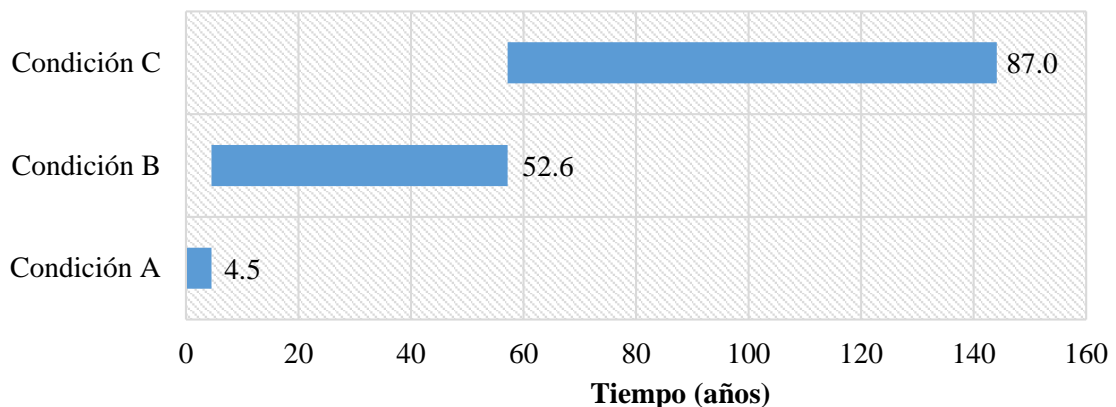


Figura 2. Representación del tiempo medio de permanencia en cada condición de degradación para los revestimientos pétreos

La distribución probabilística de la condición de degradación de los revestimientos en piedra en el tiempo es presentada en la “Figura 3”. La probabilidad de pertenencia a la condición A disminuye en el tiempo, siendo prácticamente nula (menos de 2%) a partir del año 8. La probabilidad máxima (79,2%) de pertenencia a la condición B de degradación ocurre en el año 12 y luego decrece. En cuanto a la condición C, el pico máximo de probabilidad de pertenencia a esta condición es atingido entre los años 71 y 73 (con una probabilidad de 46,1%). Por fin, la probabilidad de pertenencia a la condición D aumenta en el tiempo, siendo inferior a 10% antes del año 41 y superior a 60% a partir del año 145.

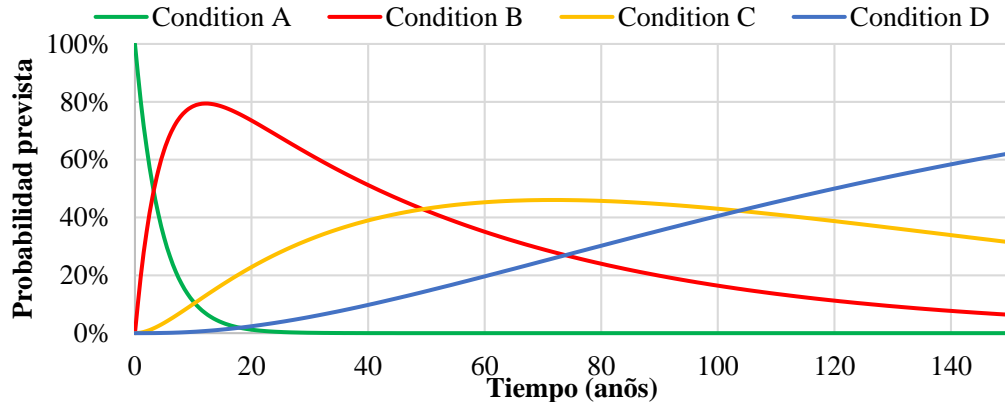


Figura 3. Distribución probabilística de la condición de la degradación de los revestimientos en piedra en el tiempo

La “Tabla 2” presenta la probabilidad de pertenencia de los revestimientos en piedra a cada una de las condiciones de degradación según su edad.

Tabla 2. Probabilidad de pertenencia a cada uno de los niveles de degradación, función la edad

Intervalo de años	Probabilidad de pertenencia a las condiciones			
	Condición A	Condición B	Condición C	Condición D
[0:10]	41,81%	53,94%	4,11%	0,14%
]10:20]	3,95%	77,34%	17,32%	1,40%
]20:30]	0,43%	67,08%	28,42%	4,07%
]30:40]	0,05%	55,84%	36,29%	7,83%
]40:50]	0,00%	46,23%	41,42%	12,34%
]50:60]	0,00%	38,25%	44,44%	17,31%
]60:70]	0,00%	31,65%	45,82%	22,53%
]70:80]	0,00%	26,18%	45,98%	27,84%
]80:90]	0,00%	21,66%	45,23%	33,11%
]90:100]	0,00%	17,92%	43,83%	38,25%
]100:110]	0,00%	14,82%	41,97%	43,21%
]110:120]	0,00%	12,27%	39,81%	47,93%
]120:130]	0,00%	10,15%	37,47%	52,39%
]130:140]	0,00%	8,39%	35,04%	56,57%
]140:150]	0,00%	6,94%	32,58%	60,47%

Entre los años 3 y 4, es semejante la probabilidad de un revestimiento en piedra pertenecer a las condiciones A y B. Entre los años 49 y 50, es idéntica la probabilidad de pertenencia a las condiciones B y C. Entre los años 103 y 104, es semejante la probabilidad de pertenencia a las condiciones C y D. En estos intervalos de tiempo, se verifica una más grande probabilidad de transición entre las condiciones de degradación.

Para testar la eficacia del modelo obtenido a través de las cadenas de Markov, se compara el número de casos que pertenecen a cada uno de los estados de degradación dados por aquél y observados en trabajo de campo (“Tabla 3”). El error porcentual obtenido es relativamente bajo, dada la complejidad del fenómeno en análisis.

Tabla 3 - Capacidad de clasificación del modelo obtenido a través de las cadenas de Markov para los revestimientos pétreos

Estado de degradación	Observado	Previsto	Error porcentual medio (%)
Condición A	9	12,096	34,40%
Condición B	114	105,419	7,53%
Condición C	57	63,959	12,21%
Condición D	23	21,527	6,41%

5. ANÁLISIS PROBABILÍSTICA DE LA DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS PÉTREOS, SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS

Algunas características de los revestimientos en piedra condicionan de forma significativa su durabilidad. Por eso, se definen distintos modelos de cadenas de Markov que permiten analizar la probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación, en el transcurso del tiempo y en función de esas características. Se analizan las siguientes variables: (a) tipo de piedra; (b) tipo de acabado; (c) dimensión de la placa de piedra; (d) exposición a la humedad; (e) cercanía del mar. La discusión de los resultados obtenidos se encuentra en la sección 5; de seguida se presentan algunas consideraciones relativas a la durabilidad de los revestimientos en piedra, función de sus características.

5.1 Tipo de piedra

Koch e Siegesmund (2004) refieren que la durabilidad es un requisito fundamental a considerar cuando se especifica piedra natural como material de revestimiento, principalmente en revestimientos exteriores, expuestos a agentes ambientales de degradación. Así, es relevante la análisis de la influencia del tipo de piedra en la progresión de la degradación en los revestimientos. En la “Figura 4” se presenta la distribución probabilística de la condición de degradación en el tiempo, según el tipo de piedra utilizada en el revestimiento. Las piedras calcáreas son las que se quedan más tiempo en la condición A de degradación; para los restantes tipos de piedra, es semejante el tiempo de permanencia en esta condición. En cuanto a la condición B, para los revestimientos calcáreas, la probabilidad máxima ($P = 85,2\%$) de pertenencia en esta condición ocurre en el año 7; para los revestimientos de mármol, la probabilidad máxima ($P = 73,7\%$) se alcanza en el año 12 y para los revestimientos de granito la probabilidad máxima ($P = 83,5\%$) ocurre en el año 18. Respecto en nivel C, los revestimientos en mármol alcanzan su probabilidad máxima de ($P = 4,7\%$) pertenencia a esta condición entre los años 55 y 56, los revestimientos calcáreas alcanzan esa cumbre ($P = 52,5\%$) entre los años 66 y 67 y los revestimientos de granito la alcanzan ($36,7\%$) entre los años 105 y 108 (significativamente después). La más grande

probabilidad de transición entre las condiciones B y C se da entre los años 37 y 38 para los revestimientos calcáreos, entre los años 40 y 41 para los mármoles; y entre los años 106 y 108, para los granitos.

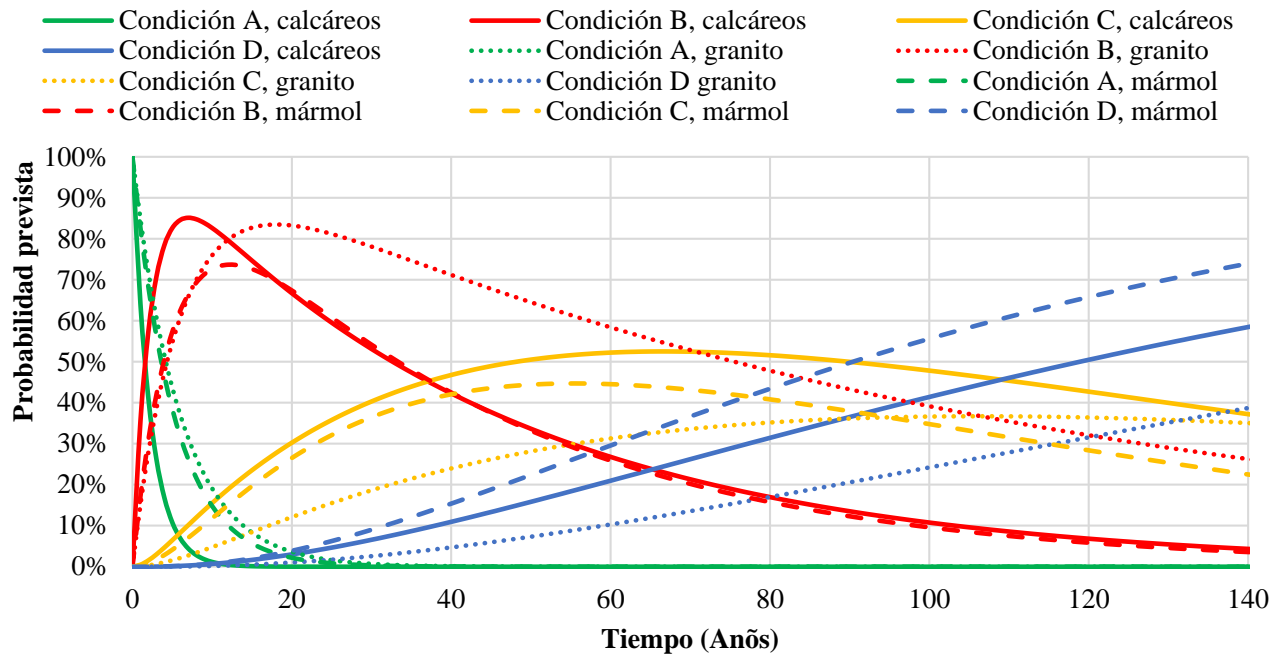


Figura 4. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función del tipo de piedra

5.2 Dimensión de la placa de piedra

En la “Figura 5” se presenta la distribución probabilística de pertenencia a cada condición en transcurso del tiempo, función de la dimensión de la placa de piedra.

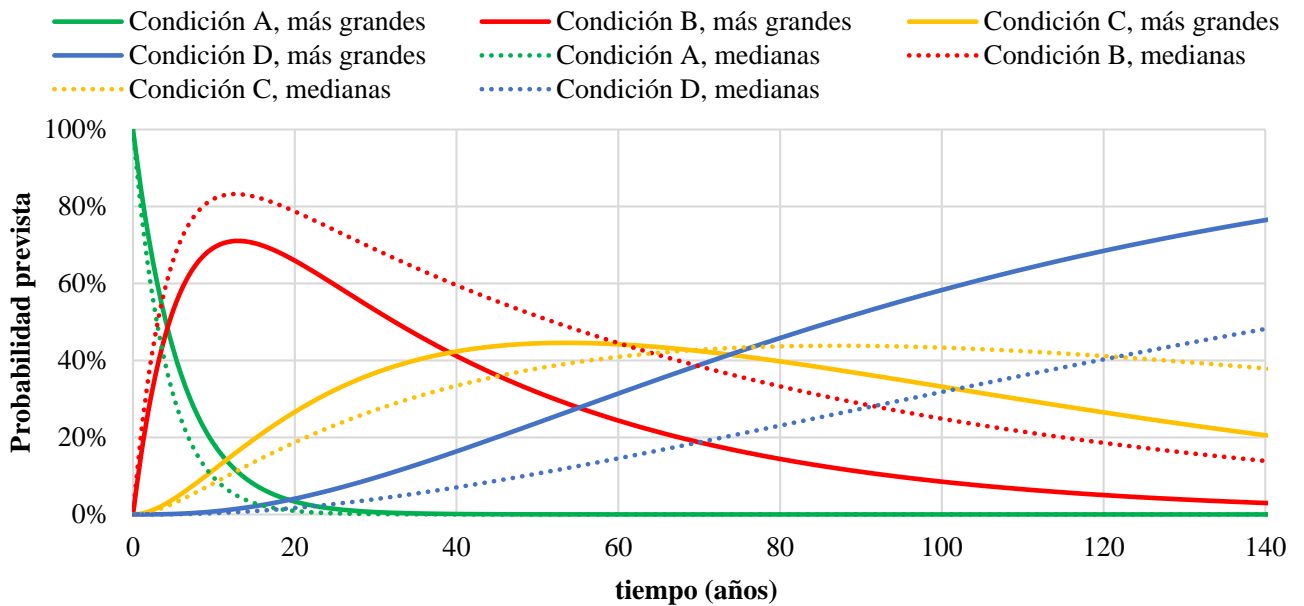


Figura 5. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función de la dimensión de la placa de piedra

Los revestimientos en piedra con placas de dimensiones más grandes ($A \geq 0,4 \text{ m}^2$) tienen una probabilidad máxima de pertenencia a la condición B sobre los 13 años de edad ($P = 71,1\%$) y de pertenencia a la condición C entre los años 54 y 54 ($P = 44,6\%$). Estos revestimientos presentan una probabilidad máxima de transición entre las condiciones B y C entre los años 39 y 40 y entre las condiciones C y D entre los años 73 y 74. Por su turno, los revestimientos con placas en piedra de dimensiones medianas ($A < 0,4 \text{ m}^2$) presentan una probabilidad máxima de pertenencia a la condición B sobre los 13 años de edad ($P = 83,2\%$) y la probabilidad de pertenencia a la condición C alcanza su cumbre entre los años 86 y 88 ($P = 43,8\%$). Para estos revestimientos, la transición entre condiciones B y C tiene más probabilidad de ocurrencia entre los años 64 y 65, mientras la transición entre las condiciones B y C presenta más grande probabilidad de darse entre los años 1221 y 122.

5.3 Exposición a la humedad

En la “Figura 6” se enseña la distribución probabilística de pertenencia a cada condición en el transcurso del tiempo, función de la exposición a la humedad. En la definición del grade de exposición de los revestimientos en piedra a la humedad se consideran dos categorías: (i) baja exposición, para edificios ubicados en contexto urbano, distando más de 5km del mar y sin la influencia de vientos dominantes; (ii) edificios en zonas de costa, sin protección de la acción conjunta de viento y lluvia. Los revestimientos con alta exposición a la humedad cambian más rápidamente de la condición más favorable (condición A) para la siguiente. Para revestimientos con alta exposición a la humedad, la probabilidad de pertenencia a la condición B alcanza su cumbre sobre el año 8 ($P = 83,3\%$) y la probabilidad de pertenencia a la condición C lo alcanza entre los años 51 y 52 ($P = 38,7\%$). Los revestimientos con una baja exposición alcanzan probabilidades máximas ($P = 72,7\%$) de pertenencia a la condición B en el año 17 y a la condición C ($P = 48,4\%$) en el año 80.

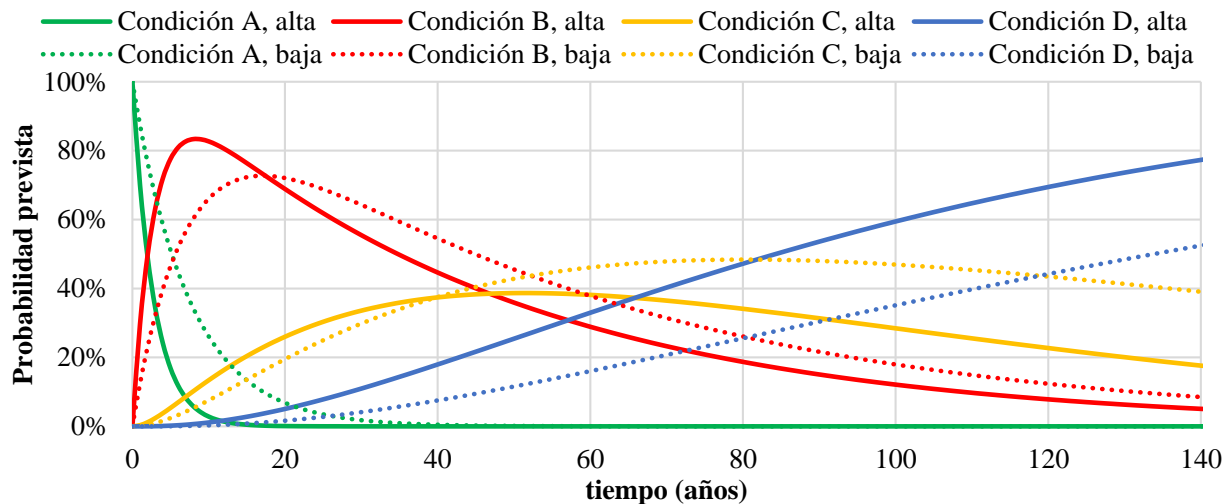


Figura 6. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función del grado de exposición a la humedad

5.4 Proximidad del mar

La “Figura 7” presenta la distribución probabilística de la condición de la degradación en el transcurso del tiempo, función de la proximidad del mar. La probabilidad y tiempo de permanencia en la condición más favorable (A) son prácticamente los mismos para las fachadas ubicadas más de 5km y menos de 5km del mar. Para fachadas localizadas en la zona costera, las máximas probabilidades de pertenencia a la condición B es de 71,7% en el año 10 y a la condición C es de

43,1% en el año 43. Los revestimientos ubicados a 5km o más del mar alcanzan una máxima probabilidad de pertenencia a la condición B de 84,6% en el año 13 en una máxima probabilidad de pertenencia a la condición C de 41,3% entre los años 92 y 94.

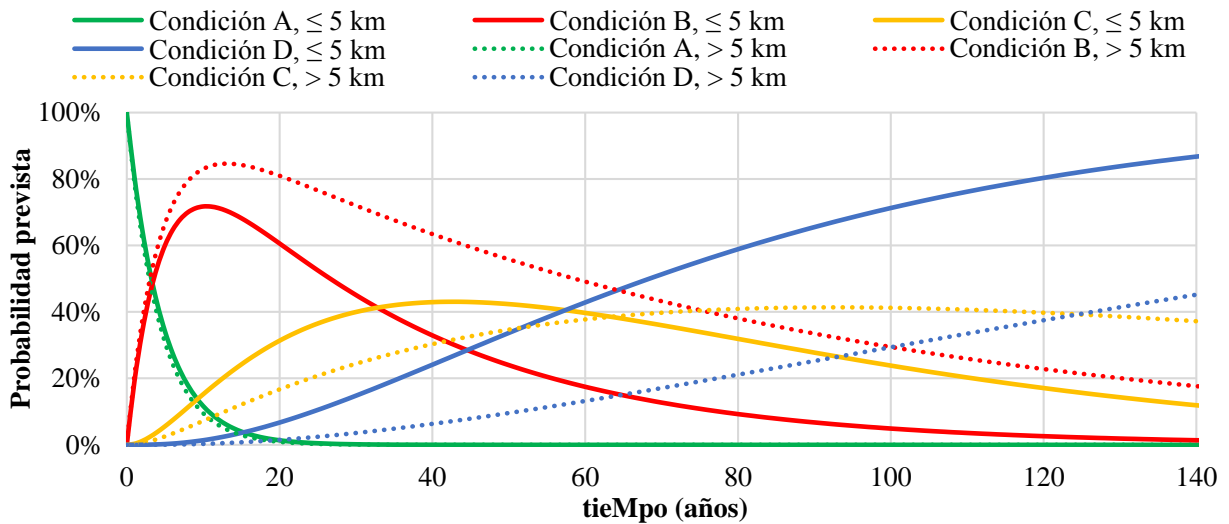


Figura 7. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función da proximidad del mar

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En la “Tabla 4” se presenta la probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación para los revestimientos en piedra natural, función de las variables consideradas. Los resultados obtenidos son coherentes y creíbles desde un punto de vista físico, permitiendo las conclusiones principales siguientes:

- los revestimientos de granito presentan una probabilidad de 94,4% de pertenencia a las condiciones de degradación más favorables (A y B) y una probabilidad nula de pertenencia a la condición D; los revestimientos de mármol son los que presentan una más grande probabilidad de alcanzaren el nivel de degradación más desfavorable; estos datos confirman los resultados obtenidos en estudios anteriores, que indican que los revestimientos de granito son los más durables, alcanzando el fin de su vida útil más tarde, seguidos de los revestimientos calcáreos e de los mármoles (cuyo máximo límite de degradación se alcanza más temprano);
- los revestimientos con placas en piedra de dimensiones medianas tienen menor probabilidad de pertenencia a condiciones de degradación más graves si comparados con revestimientos con placas en piedra de grandes dimensiones; se confirma así la tendencia de los revestimientos con placas de piedra con dimensiones más grandes de presentaren índices de degradación más elevados, por causa de una más grande concentración de tensiones en el sistema de revestimiento y de un más elevado peso propio (Silva et al., 2012);
- los revestimientos con alta exposición a la humedad tienen más grande probabilidad de pertenencia a la más elevada condición de degradación ($P = 14,3\%$, mientras se obtiene $P = 9,2\%$ para revestimientos con baja exposición); los revestimientos con alta exposición también presentan una más grande probabilidad (aunque poco significativa) de pertenencia a condiciones más favorables (A y B);

- los revestimientos localizados a 5km o más del mar tienen más grande probabilidad de pertenencia a las condiciones de degradación A y B ($P = 68,6\%$, mientras se obtiene $P = 51,9\%$ para aquellos ubicados a menos de 5km); los revestimientos en zona de costa presentan una probabilidad de pertenencia a la condición de degradación más grave de $P = 26\%$, lo que es substancialmente más alto do que la do los revestimientos lejos de la costa ($P = 2,5\%$), lo que revela que, tal como esperado, los revestimientos más cercanos de las zonas de costa presentan niveles de degradación más altos.

Tabla 4. Probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación, función de las variables consideradas

Variables consideradas		Probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación			
		Condición A	Condición B	Condición C	Condición D
Tipo de piedra	Calcáreo	4,2%	45,8%	38,9%	11,1%
	Granito	5,6%	88,9%	5,6%	0%
	Mármol	3,9%	42,9%	33,8%	19,5%
Dimensión de la placa	Medianas	6,2%	65,1%	24,8%	3,9%
	Grandes	1,4%	40,5%	33,8%	24,3%
Exposición a la humedad	Alta	6,0%	60,7%	19,0%	14,3%
	Baja	3,4%	52,9%	34,5%	9,2%
Proximidad del mar	Hasta 5km	7,8%	44,2%	22,1%	26,0%
	> 5km	2,5%	66,1%	28,9%	2,5%

Los límites superior e inferior de las condiciones C y D corresponden respectivamente al límite máximo admisible de degradación, que se asume en esto estudio como el fin de la vida útil de los revestimientos de fachada. Así, la máxima probabilidad de transición entra la condición C y la condición D marca el instante con más grande probabilidad de ser alcanzado el final de la vida útil de los revestimientos en piedra. Para la muestra global, este instante se da entre los años 103 y 104. En lo que respecta al tipo de piedra, máxima probabilidad de transición entra la condición C y la condición D ocurre: sobre el año 109, para los revestimientos calcáreos, entre los años 77 y 78, para los mármoles; y entre los años 131 y 132 para los revestimientos de granito. Los resultados indican que los granitos son el tipo de piedra más durable, seguidos de los calcáreos y de los mármoles; esta conclusión confirma un estudio realizado por Schouenborg et al. (2007), en el que se analizan 200 edificios, se testa la resistencia mecánica de la piedra natural, a través de ensayos de laboratorio e *in situ*, y se obtienen resultados semejantes. Los revestimientos con placas de piedra de dimensiones medianas cambian del nivel C para el D bastante más tarde (entre los años 121 y 122) que los revestimientos con placas de grandes dimensiones (entre los años 73 y 74). De hecho, los revestimientos con placas de grandes dimensiones alcanzan más rápidamente el fin de su vida útil ya que cuanto más grandes las dimensiones de las placas de piedra, menor es el área ocupada por las juntas, lo que puede originar una más grande concentración de tensiones; por otro lado, placas de más grande dimensión corresponden a elementos más pesados, lo que exige igualmente más grandes espesuras de placa para evitar su fractura luego en la fase de transporte y colocación en obra (Silva et al., 2012). En lo que respecta al grado de exposición a la humedad, la transición entre las condiciones C y D tiene más grande probabilidad de darse entre los años 65 y 66, para revestimientos con alta exposición, y entre los años 118 y 119, para revestimientos con baja exposición, lo que confirma la tendencia de una más rápida degradación de los revestimientos con

alto grado de exposición. Para los revestimientos en zonas de costa, la transición entre condiciones B y C tiene más grande probabilidad de darse entre los años 32 y 33, mientras la transición entre las condiciones C y D ocurre con más probabilidad entre los años 57 y 58. Ya los revestimientos localizados lejos de la costa (más de 5km) tienen más grande probabilidad de transición entre las condiciones B y C entre los años 75 y 76 y una más grande probabilidad de transición entre las condiciones C y D entre los años 124 y 125. Los revestimientos en zonas de costa son más propensos a más elevados índices de degradación debido a su exposición a vientos que contienen sales marinos nocivos para la piedra natural.

La distribución de probabilidad de la condición de degradación de los revestimientos en piedra en el transcurso del tiempo puede también ser interpretada como un modo de evaluación de riesgo del desempeño de las fachadas debido al proceso de su degradación. Así, definiendo el límite de riesgo que considera aceptable, cualquier actor / decidor en el proceso constructivo puede visualizar las necesidades de reparación basadas en el análisis probabilística de un conjunto de datos. Para ilustrar este concepto, puede considerarse que las probabilidades “alta”, “mediana” y “baja” de pertenencia a una dada condición corresponden a un riesgo “alto”, “mediano” y “bajo” asociado a las consecuencias de los fallos detectados y al coste de reparación, lo que permite una indicación de la urgencia de las acciones de mantenimiento y reparación. Se considera que un riesgo bajo (no son requeridas acciones sino una monitorización de la evolución de la degradación de la fachada) corresponde a $P > 75\%$ de pertenencia a las condiciones A o B. Un riesgo alto (necesaria una reparación generalizada) corresponde a $P > 25\%$ de pertenencia a la condición “D”; y un riesgo mediano corresponde a las situaciones intermedias. Con base en los resultados obtenidos y en función de los presupuestos anteriormente asumidos, se puede hacer algunas recomendaciones: i) los revestimientos en piedra deben de ser monitorizados antes de los 20 años; ii) deben de ser realizados trabajos de reparación antes de los 70 años; iii) a partir de los 70 años, si no hay intervención, se puede considerar la sustitución de los revestimientos.

7. CONCLUSIÓN

En la modelación de la vida útil, es relevante conocer a la taja de transición entre estados de degradación, antever el comportamiento del elemento en estudio y prever el momento a partir del que él no dará respuesta a las exigencias para las que ha sido proyectado.

En el presente estudio, el desempeño futuro de los revestimientos en piedra es previsto a través de la utilización de las cadenas de Markov, que corresponden a un modelo estocástico con ancha utilización en el dominio de la modelación de la durabilidad, que necesita de poca información en su calibración. Los modelos propuestos en este estudio consiguen fornecer indicaciones relativas a un proceso complejo, como lo es la degradación de las fachadas, y dan información relativa a la sinergia entre los agentes de degradación (como es el caso de las condiciones de exposición ambiental) y las condiciones o niveles de degradación. Además, el presente estudio nos da información relativa a la distribución probabilística de la condición de los revestimientos en el transcurso del tiempo (y función de sus características más relevantes), así como el conocimiento del tiempo medio de permanencia en cada nivel de condición de degradación hasta la transición para la condición siguiente y la indicación de los efectos de la degradación en la durabilidad de los revestimientos pétreos. Esta información es útil en la definición (de un modo racional y técnicamente informado) de un abanico de estrategias de mantenimiento en el ciclo de vida del edificio. Los modelos estocásticos, como las cadenas de Markov, fornecen información crucial en el contexto de las premios de seguros, porque permiten la evaluación del riesgo de fallo en los revestimientos y permiten estimar el instante más probable para la rotura de los elementos de la construcción, de acuerdo con sus características.

8. REFERENCIAS

- Balaras, A., Droutsa, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis S. (2005) “*Deterioration of European apartment buildings*”, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 5, pp. 515-527.
- Basso, N., Garavaglia, E., Sgambi, L. (2012) “*Selective maintenance planning based on a Markovian approach*”, IALCCE - International Association for life-cycle Civil Engineering, 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, Austria, pp. 435-441.
- Carrington, P.J., Scott, J., Wasserman, S. (eds.) (2005) “*Models and methods in social network analysis*” (New York, USA, Cambridge University Press).
- Fletcher, R., Powell, M.J.D. (1963) “*A rapidly convergent descent method for minimization*”, Computer Journal, V. 6, pp. 163-168.
- Frangopol, D.M., Kallen, M.-J., Noortwijk, J.M.V. (2004) “*Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions*”, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 197-212.
- Higham, D., Higham, N. (2005) “*MATLAB guide*” (Philadelphia, USA, Society for Industrial Mathematics).
- Kalbfleisch, J.D., Lawless, J.F. (1985) “*The analysis of panel data under a Markov assumption*”, Journal of the American Statistical Association, Vol. 80, No. 392, pp. 863-871.
- Koch, A., Siegesmund, S. (2004) “*The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble*”, Environmental Geology, Vol. 46, No. 3-4, pp. 350-363.
- Moser, K. (2003) “*Engineering design methods for service life planning - State of the art*”, International Workshop on Management of Durability in the Building Process, Politecnico di Milano, Milan, Italy, paper 40.
- Neves, L. C., Frangopol, D. M., Cruz, P. J. S. (2006) “*Lifetime multi-objective optimization of maintenance of existing steel structures*”, 6th International Symposium Steel Bridges, European Convention for Construction Steelwork, Prague, Czech Republic, pp. 206-215.
- Schouenborg, B., Grell, B., Malaga, K. (2007) “*Testing and assessment of marble and limestone (TEAM) - Important results from a large European research project on cladding panels*”, ASTM International, Vol. 4, No. 5, pp. 10-22.
- Shohet, I., Rosenfeld, Y., Puterman, M., Gilboa, E. (1999) “*Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach*”, 8th DBMC, Conference on Durability of Building Materials and Components; Ottawa, Canada, pp.1666-1678.
- Silva, A., Brito, J. de, Gaspar, P. L. (2012) “*Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding*”, Automation in Construction, Vol. 22, pp. 165-174.
- Straub, A. (2003) “*Using a condition-dependent approach to maintenance to control costs and performances*”, Facilities Management, Vol. 1, No. 4, pp. 380-395.



Elección del tipo de cemento capaz de proteger al concreto de la corrosión de las armaduras sobre la acción de iones cloruros a través del análisis jerárquico

S. H. Lopes da Silva¹, C. Londero¹, M. H. F. Medeiros¹, V. C. O. Pereira², E. C. B. Monteiro³

¹ Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Email: sarahhlds@gmail.com, carolinalondero7@gmail.com, medeiros.ufpr@gmail.com

² Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Brasil.

³ Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco e Universidade Católica de Pernambuco, Brasil. Email: eliana@poli.br

Información del artículo

Artículo recibido el 20 de Noviembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de junio de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

RESUMEN

Este trabajo discute las combinaciones de tipos de cemento buscando obtener el de mayor capacidad de proteger al concreto de la corrosión de las armaduras ante la acción del ion cloruro. Para ello se usó el método de análisis jerárquico (AHP), basado en la definición de elementos principales para la toma de decisión rápida, confiable y objetiva. Fueron analizados tres tipos de cemento (CPII-Z-32: con adición de puzolana, CPIII-40: con adición de escoria y CPIV-32: con adición de puzolana), dos relaciones agua/cemento (0,4 y 0,7) y dos tiempos de curado (7 y 28 días), a través de los resultados de cinco ensayos. La aplicación del AHP se mostró eficaz en la elección del tipo de cemento, generando la constatación que el cemento CPIII-40 presentó el mejor desempeño entre los cementos evaluados

Palabras clave: Análisis Jerárquico, concreto armado, corrosión de las armaduras

RESUMO

Este trabalho discute combinações de tipos de cimento, buscando obter o de maior capacidade de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de cloretos. Para isso, utilizou-se o método Análise Hierárquica (AHP), baseado na definição de elementos principais para uma tomada de decisão rápida, confiável e objetiva. Foram analisados três tipos de cimento (CPII-Z-32: com adição de pozolana, CPIII-40: com adição de escória e CPIV-32: com adição de pozolana), duas relações água/cimento (0,4 e 0,7) e dois tempos de cura (7 e 28 dias), através do resultado de cinco ensaios. A aplicação do AHP mostrou-se eficaz na escolha do tipo de cimento, gerando a constatação que o cimento CPIII-40 apresentou o melhor desempenho entre os cimentos avaliados.

Palavras-chave: Análise hierárquica. Concreto armado. Corrosão de armadura.

ABSTRACT

This paper discusses cement types combinations to obtain the best one to protect against the steel reinforcement corrosion caused by chloride ions. In this case, it was used the method of Analytic Hierarchy Process (AHP), which is based on the definition of the main elements for making fast, reliable and objective decision. Three types of cement (CPII-Z-32: pozzolanic admixture, CPIII-40: blast furnace slag admixture and CPIV-32: pozzolanic admixture), two water/cement ratio (0,4 and 0,7) and two curing times (7 and 28 days), were analyzed through results of five experiments. The application of AHP was effective to choose the type of cement, concluding that the CPIII-40 cement showed the best performance compared to the other cements.

Keywords: Analytical hierarchy process. Reinforced concrete. Steel corrosion.

Autor de correspondencia: Marcelo Medeiros

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

1. INTRODUCCION

El concreto constituye uno de los principales materiales de construcción utilizados en La sociedad moderna, siendo El cemento portland El material de construcción más adecuado para esas estructuras, superando alternativas también viables, como El acero y La madera. Eso se debe a La combinación de los materiales que trabajan para resistir esfuerzos distintos siendo que El concreto resiste bien La compresión y El acero La tracción, permitiendo así una variedad de aplicaciones.

Su uso intenso tuvo inicio a partir de la década de los 50, hasta mediados de los años 70 se creía que el concreto armado era un material que no se deterioraba. Sin embargo en esa época las estructuras elaboradas con ese material comenzaron a presentar manifestaciones patológicas, haciendo que surgiera una preocupación en cuanto a la durabilidad del mismo. (Medeiros 2008).

A partir de allí, muchas investigaciones fueron realizadas con El objetivo de suprimir La incidencia de las manifestaciones patológicas en estructuras de concreto armado. Así Andrade 1997 concluyo que El 64% de las manifestaciones patológicas encontradas en las edificaciones Del Estado de Pernambuco, consistían en corrosión de La armadura por ataque intenso de cloruros.

Por lo tanto el deterioro de las estructuras de concreto armado debido a La corrosión de armaduras representa uno de los grandes problemas de La construcción civil. Eso ES porque El costo de La reparación de estas fallas puede corresponder AL 3,5% de pérdida anual Del producto interno bruto de Brasil, debido a inversiones de prevención de La corrosión y en mantenimiento o sustitución de elementos estructurales deteriorados por La corrosión.

(DOTTO, 2006).

Este proceso citado, ocurre por un mecanismo electroquímico que dispone necesariamente por lo menos de una reacción de oxidación y una de reducción que se Dan simultáneamente. Por lo tanto hay tres condiciones básicas para que ocurra La corrosión: existencia de un electrolito; diferencia de potencial del electrodo en presencia de oxígeno (BARBOSA et al., 2012). Según Pereira et al. (2013), la corrosión de La armadura puede ser influenciada por factores tales como las propiedades del concreto, tiempo de exposición al agente agresivo, condiciones de la superficie de la barra de acero, características del ambiente donde la estructura está embutida, entre otros. Normalmente el concreto ofrece un grado de protección contra la corrosión AL acero, debido a la formación de una fina película de óxidos protectora en su superficie, en virtud de la alta alcalinidad del material. No obstante, la presencia de cloruros a partir de 0,4 % de la masa de cemento, la película que antes protegía la armadura y destruida y El acero se despasiva propiciándose la corrosión.

En ese sentido los investigadores como Page et al. (1986), Tessari (2001), Mather (2004), Sakr (2004) y Pereira (2011), hicieron estudios sobre la influencia de los tipos de cemento y sus adiciones en La protección contra el ataque de cloruros. Según esos investigadores, las adiciones de los diversos tipos de cemento pueden contribuir con beneficios como La reducción de la permeabilidad y porosidad capilar. Por lo tanto, con esos beneficios y sus influencias en lo referente a corrosión de las armaduras, surge La hipótesis de que los tipos de cemento influyen en la protección de la corrosión de armaduras causada por cloruros.

Según lo expuesto y usando los datos obtenidos de La investigación de maestría de Pereira (2011), este trabajo presenta una discusión, a partir Del análisis jerárquico sobre La elección de algunos tipos de cemento de La región noreste de Brasil, CII-Z-32 (cemento Portland

compuesto con puzolana), CPIII-40 (cemento Portland de alto horno) y CPIV-32 (cemento Portland puzolánico), según la corrosión de las armaduras sobre la acción de cloruros.

2. FACTORES DE INFLUENCIA EN LA PENETRACION DE CLORUROS EN COMPUESTOS DE CEMENTO PORTLAND

La corrosión de las armaduras puede ocurrir por procesos nocivos de naturaleza química o electroquímica. Para el caso de elementos estructurales de concreto armado expuestos al ataque de cloruros, principalmente en ambientes marítimos, se percibe que son frecuentes las manifestaciones patológicas como: figuración, de laminación y pérdida Del espesor de recubrimiento. La causa de estas manifestaciones se encuentra en el proceso de perdida de sección de las barras de acero debido a La propia corrosión de las mismas, que a su vez trae La formación de productos expansivos en el interior del concreto.

Para que no ocurra el proceso de corrosión ES necesario, primeramente, que el concreto se encuentre en un medio alcalino provisto de hidróxidos. Siendo así, debido a la alta alcalinidad, se forma sobre la superficie de las barras de acero una película de óxidos que actúa como barrera de protección de las mismas. Por lo tanto de existir contaminación por cloruros, la corrosión de armaduras puede ocurrir mismo con o pH do concreto estando por volta de 13 como no concreto nuevo.

Como la corrosión que se explica ocurre en un medio acuoso, el proceso ES caracterizado como electroquímico, ES decir supone que exista una reacción de oxidación y una de reducción, y circulación de iones a través del electrolito, siendo este responsable por El deterioro Del concreto (HELENE, 1993).

Uno de los principales factores de influencia de la corrosión ES la estructura de poros del espesor de recubrimiento, que si ES de elevada absorción debe resultar en un proceso de corrosión más acelerado. De ese modo, El ingreso del agua, varía dependiendo de la porosidad, y es de gran importancia controlar El índice de humedad, oxígeno, CO₂ y principalmente de cloruros dentro del concreto (CERVO, 2001). Siendo así se vuelve más importante La evaluación Del tipo de cemento, de la relación agua/cemento y de las condiciones de curado como influyente para el proceso corrosivo de armaduras por ataque de cloruros.

La composición química del cemento también influye significativamente en el proceso de corrosión debido a la presencia de iones cloruros, pues el aluminato tricálcico (C₃A) y El ferroaluminato tetra cálcico (C₄AF) se combinan con los cloruros formando los cloro aluminatos. El aluminato tricálcico tiene la capacidad de inmovilizar los iones cloruros, por medio de la formación de un compuesto insoluble llamado cloro aluminato de calcio hidratado (PAGE *et al.*, 1986). El trabajo de Hoppe Hijo et al. (2013), aplicando la técnica de difracción de rayos X, también indica la formación de cloro-aluminato en concreto sometido al contacto con La solución acuosa de iones cloruros.

Es importante destacar que, las adiciones minerales como las puzolanas en la composición del cemento, reducen la porosidad dejando el concreto menos susceptible a La percolación de líquidos, por tanto, disminuyendo la permeabilidad. Además de eso las puzolanas poseen buena capacidad de retención de cloruros, por presentar elevados contenidos de alúmina (CERVO, 2001).

Así como la composición química del cemento, a relación agua/cemento influye directamente en la forma, El tamaño y en La distribución de los poros. Por tanto, uno de los factores regentes de la penetración de cloruros es esa relación. Esto ocurre, pues La baja relación a/c disminuye la porosidad del concreto disminuyendo la penetrabilidad y la difusión. De esta forma, diversas

investigaciones proponen estudios de penetración de los iones cloruro en función de diferentes relaciones agua/cemento. Esos estudios comprobaron que cuanto más baja la relación a/c, menor la cantidad de penetración de cloruros (GASTALDINI *et al.*, 2010).

Otro factor de influencia sobre la difusión de los iones cloruros en compuestos de cemento Portland ES El curado que también influye en la formación de la estructura de los poros en la pasta de cemento Portland. Cuanto mayores el tiempo de curado del concreto, mayor la resistencia a la entrada de agentes agresivos, pues hay una mejora en las condiciones internas y superficiales del recubrimiento debido a hidratación del cemento.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabajo consiste en una aplicación la herramienta en La toma de decisión llamado análisis jerárquico, que toma como sustento una base de datos para la fundamentación de una escogencia en una aplicación específica. A continuación están presentadas las condiciones y premisas adoptadas en este trabajo, que tuvo como foco La elección del tipo de cemento más adecuado en una condición de ejecución de obras sometidas a un ambiente contaminado por iones cloruros.

3.1. Datos del estudio usado como base de datos para la AHP

El trabajo usado como base de datos de esta aplicación de AHP fue desarrollado por Pereira (2011). En ese trabajo, fueron usadas las variables de estudio a continuación mostradas:

- Relación agua/cemento (2 niveles – a/c = 0,4 y 0,7) – fueron escogidos dos niveles de relación a/c bien diferentes para intentar evidenciar el efecto de este parámetro de forma más significativa;
- Tipo de cemento (3 niveles - CPII-Z-32, CPIII-40 y CPIV-32) - Esta elección fue en base a las capacidades de protección en ambientes contaminados por cloruros. Los cementos CPII-Z-32 y CPIV-32 utilizados en La investigación son compuestos, respectivamente, 12% y 43% de puzolana natural proveniente de roca, y en la composición del CPIII-40 hay 67% de escoria de alto-horno;
- Proceso de curado (2 niveles – 7 y 28 días en cámara húmeda) – fueron escogidos dos períodos de curado en cámara húmeda con La intención de cuantificar la magnitud de la importancia de elevar el tiempo de curado de los componentes del cemento Portland.

Durante el programa experimental se preocupó en mantener las mismas condiciones de las probetas elaborándolos dentro del mismo rango de trabajabilidad, variando entre 260 mm y 300 mm. Para la realización de los ensayos complementarios fueron adoptados probetas cilíndricas de mortero de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Para El ensayo de corrosión acelerada fueron confeccionados probetas prismáticas en las dimensiones de 60 x 80 x 25 mm, con dos barras de 5 mm de diámetro, 100 mm de largo y con 10 mm de recubrimiento.

Luego Del curado y secados en ambiente de laboratorio por 15 días, las probetas prismáticas fueron sometidas al ensayo de corrosión que consistió en semiciclos de secado y humectación por inmersión parcial en una solución acuosa con 5% de NaCl, durante tres meses. Los semiciclos se caracterizaron en 5 días en que las probetas estaban dentro de la estufa, y después 2 días en que los mismos quedaban parcialmente sumergidos en la solución citada.

Para la ejecución del ensayo de corrosión acelerada fue necesario que hubiera como aparatos los siguientes ítems: un electrodo de referencia, un dispositivo eléctrico, cables eléctricos y un voltímetro de alta impedancia. Para La medición del potencial de corrosión se conectaron los polos positivo y negativo, respectivamente, a la barra de acero y al electrodo de referencia. De esa forma, el voltímetro indica la intensidad de la diferencia de potencial entre las semicélulas,

siendo un parámetro indicativo de la ocurrencia o no de corrosión de armaduras (PEREIRA, 2011).

Para cerrar el circuito es necesaria una interface conductiva entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo (barra de acero) y eso fue hecho usando una esponja saturada colocada en el contacto eléctrico entre el electrodo de referencia y la superficie del concreto. La Figura 1 ilustra la configuración del ensayo de determinación del potencial de corrosión (MEDEIROS et al., 2013).

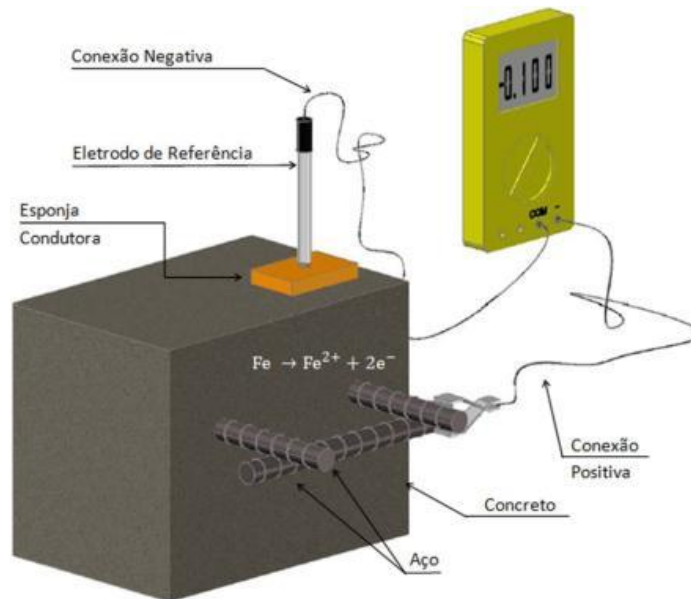


Figura 1. Configuración del circuito para La determinación del potencial de corrosión (ROCHA, 2012; MEDEIROS et al., 2013)

El objetivo del método no es cuantificar la corrosión de acero, una vez que El índice de corrosión no es determinado con el procedimiento. Según Medeiros, Balbinot y Helene (2010), el potencial de corrosión identifica los locales de La pieza en estudio donde las condiciones termodinámicas son favorables al inicio del proceso de corrosión, aun cuando la armadura no presente señales en la superficie de concreto que lo recubre

Para la evaluación de la probabilidad de corrosión, fue usado el procedimiento recomendado en la ASTM C 876 (2009), siendo que para el potencial de corrosión referente al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (E_{corr}) menor que -350 mV, la probabilidad de corrosión es mayor que 90%. Y para E_{corr} mayor que -200 mV, la probabilidad de corrosión es menor que 10%.

Además del ensayo de envejecimiento acelerado, se realizaron los ensayos complementarios de absorción por inmersión (ABNT NBR 9778:1987), absorción por capilaridad (ABNT NBR 9779:1995) y resistencia a la compresión (ABNT NBR 7215:1997). La intención del autor en realizar los ensayos complementarios fue de auxiliar en la compresión e interpretación del ensayo principal.

3.2. Método de Análisis Jerárquica

La toma de decisión para problemas complejos exige un tratamiento de datos simplificados, entretanto sistemático con El fin de obtener resultados rápidos, confiables y que no sean onerosos.

Tomando en cuenta factores de importancia para la realización de una determinada elección, Saaty desarrollo en 1971 la técnica da análisis Jerárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*). El AHP consiste en una herramienta de decisión multi-criterio abordando factores que son organizados en una estructura Jerárquica (SAATY, 1990).

En La ingeniería civil, el potencial del análisis Jerárquico ha sido poco explorado, pero se pueden citar algunos estudios que lo usaron como la herramienta e instrumento de decisión, tales como: 1 - Marchezetti et al. (2011), en el tratamiento de residuos domiciliarios; 2 - Silva y Souza (2011), en la selección de camiones colectores compactadores de residuos sólidos; 3 - Lisboa y Waisman (2006) y Zayed et al. (2008) en las decisiones relacionadas en el área de proyecto de vialidad; 4 - Pan (2008), en la selección de métodos de construcción de puentes; 5 - Lai et al. (2008), en el proyecto de obras públicas; 6 – Pereira, Medeiros y Levy (2012), para elegir los porcentajes de sustitución de residuos de construcción como agregados en La dosis de concretos; 7 – Mattana et al. (2012), en La elección de morteros de revestimiento; 8 – Pereira et al. (2014), elegir mortero de pega para aplicación en el sistema piso sobre piso.

El método del AHP desarrolla tres principales operaciones, que corresponden a la construcción de una jerarquía, análisis de prioridades y verificaciones de consistencias. La construcción de la jerarquía consiste en separar las partes componentes del problema y organizarlas en niveles. Ya para los análisis de prioridad se realiza una comparación de los elementos de cada nivel con base en el conocimiento y experiencia Del decisor. Por fin, se ejecutan verificaciones de consistencia para garantizar La coherencia entre las comparaciones (HO, 2008).

Así, antes de iniciar la aplicación de la técnica del AHP se hace necesario definir el objetivo, que en este trabajo consiste en escoger un tipo de cemento, una relación agua/cemento (a/c) y un tiempo de curado, como fueron especificados anteriormente, capaz de proteger mejor el concreto de la corrosión das armaduras sobre La acción de iones cloruro. Así las alternativas de escoger para ese trabajo se encuentran dispuestas en la Tabla 1. Se analizó cada situación procurando obtener y comparar el mejor tipo de cemento para cada relación a/c y tiempo de curado.

Tabla 1. Combinación de los tipos de cemento para dos niveles de relación a/c y de curado

Tipo de cemento	Relación a/c	Días de curado
CP II-Z-32	0,4	07 días
CP II-Z-32	0,4	28 días
CP II-Z-32	0,7	07 días
CP II-Z-32	0,7	28 días
CP III-40	0,4	07 días
CP III-40	0,4	28 días
CP III-40	0,7	07 días
CP III-40	0,7	28 días
CP IV-32	0,4	07 días
CP IV-32	0,4	28 días
CP IV-32	0,7	07 días
CP IV-32	0,7	28 días

Luego de la definición de las opciones de elección, representados en la Tabla 1, se fijaron los criterios a ser considerados en la evaluación del desempeño de las alternativas. Pereira (2011) analizo el resultado de tres ensayos principales siendo absorción de agua, resistencia a la compresión y corrosión acelerada, que estaban en el nivel primario de jerarquía. El ensayo de absorción de agua abarca otros tres ensayos dispuestos en el nivel secundario de jerarquía, y el ensayo de corrosión acelerada también envuelve datos de ensayo de evolución del potencial de corrosión, basados en datos obtenidos con la variación de La masa de las probetas.

En la Figura 2 se encuentra El árbol Jerárquico demostrando los niveles analizados y los criterios considerados.

En la Tabla 3 están presentados los valores de la matriz de decisión del primer nivel jerárquico indicando los pesos de cada parámetro. Como los ensayos de absorción de agua y resistencia a compresión fueron considerados levemente menos importantes que el ensayo de corrosión acelerada, esos AL ser comparados con el último reciben valores inversos para caracterizar La tendencia de los datos.

Tabla 3. Matriz de decisión del primer nivel do AHP

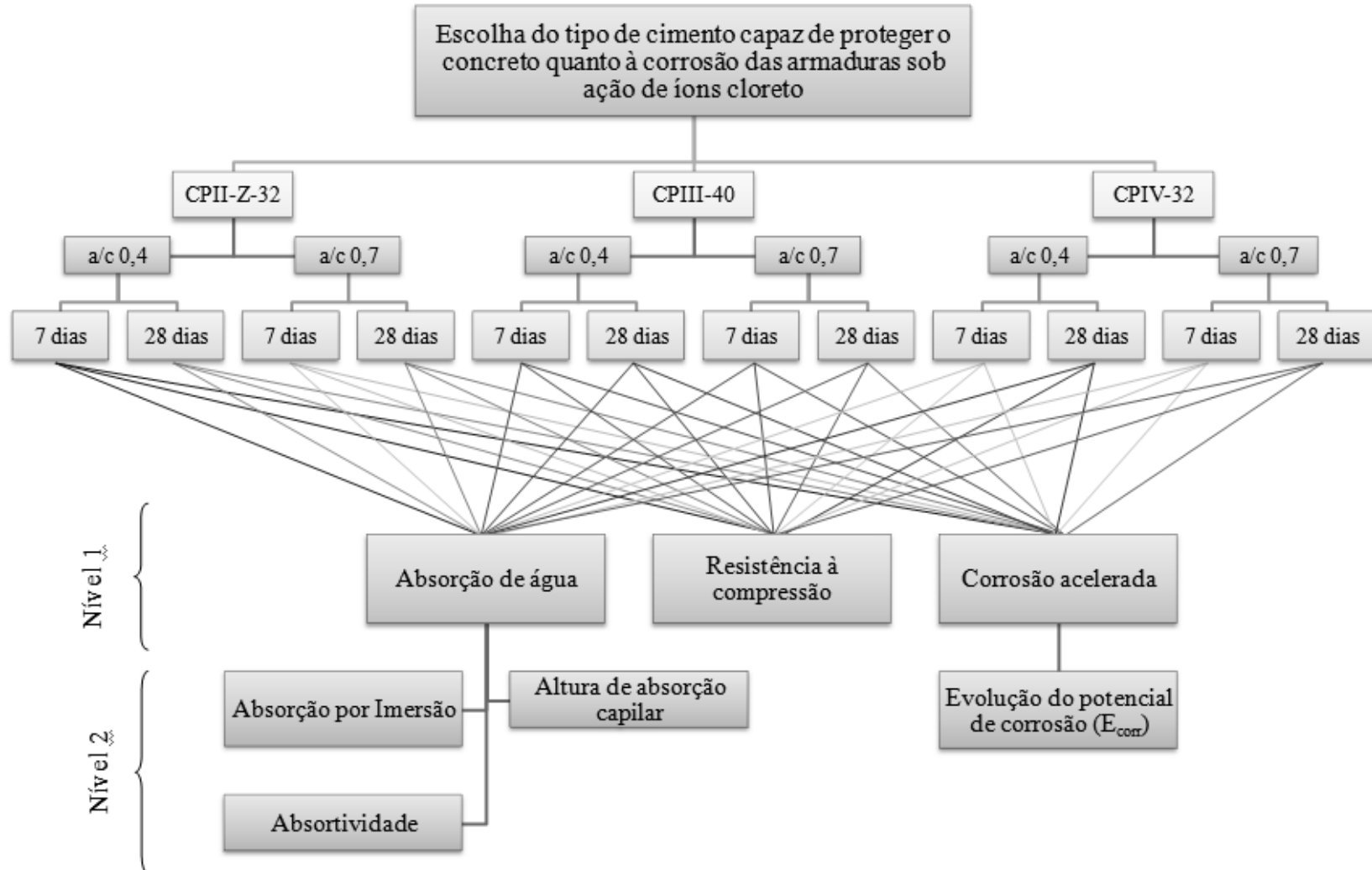
	Absorción de agua	Resistencia a compresión	Corrosión acelerada	Total de La línea (TI)	Importancia relativa
Absorción de agua	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Resistencia a compresión	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Corrosión acelerada	3,00	3,00	1,00	7,00	0,60
Total general (Tg)				11,67	1,00

En la elaboración de la matriz de decisión del segundo nivel jerárquico se opto por considerar todos los criterios analizados como Del mismo grado de importancia. Esta práctica fue realizada porque ES muy difícil y subjetivo atribuir diferentes niveles de importancia para cada uno de los tres resultados de absorción de agua. En la Tabla 4 están dispuestos los valores da matriz de decisión del segundo nivel jerárquico.

Tabla 4. Matriz de decisión del segundo nivel del AHP

	Absorción por inmersión	Altura absorción capilar (cm)	Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	Total de La línea (TI)	Importancia relativa
Absorción por inmersión	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Altura absorción capilar (cm)	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Total General (Tg)				9,00	1,00

Figura 2. Árvol de jerarquía con los criterios y niveles de análisis



Luego de resolver las matrices de decisión con los pesos de cada criterio, se calcula la consistencia del AHP, a través Del test de consistencia fundamentado por Saaty (2000) e indicado por Costa (2002). De ese modo se determino la razón de consistencia, que debe ser un valor menor o igual a 0,1. En el caso de este estudio, el cálculo de La razón resulto ser 0 (cero) para las dos matrices desarrolladas, siendo menor que el límite establecido. Así la AHP montada es considerada perfectamente consistente.

En este trabajo, todos los datos usados en la comparación de los criterios de análisis son requisitos cuantitativos, ES decir se usaron los valores numéricos extraídos de los resultados de los ensayos realizados por Pereira (2011), como se ve en la Tabla 5.

El ensayo de evolución del potencial de corrosión fue ejecutado con 12 ciclos de secado y humectación (en solución de NaCl al 5%) y duración total de 84 días. Para La evaluación del desempeño de los cementos se considero las medias de todos los resultados solamente de las fases de humectación, que por la presencia da agua presenta los valores más representativos en relación a probabilidad de corrosión.

Tabla 5. Datos generales para La elaboración del AHP

Tipo de cemento	CPII				CPIII				CPIV			
	7 días		28 días		7 días		28 días		7 días		28 días	
Relación a/c	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7
Altura ascensión capilar (cm)	4,7	6,1	4,4	6,7	3,5	5,3	3,3	4,2	4,3	4,8	3,5	5,5
Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	1,27	1,93	1,14	1,87	0,97	1,37	0,89	1,24	1,26	1,72	0,98	1,48
Absorción por inmersión (%)	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11
Resistencia a compresión (MPa)	34,5	16,8	46,2	20,4	47,5	18,7	50,0	28,6	37,1	14,5	43,6	18,3
Potencial de corrosión (mV)	-387	-474	-379	-492	-406	-514	-339	-462	-460	-481	-434	-503

4. RESULTADOS - APLICACIÓN DEL ANÁLISIS JERÁRQUICO

Con la presente investigación, utilizando los datos de ensayos realizados por Pereira (2011) y a través del método de Análisis Jerárquico, se busco obtener el mejor tipo de cemento (CPII-Z-32, CPIII-40 y CPIV-32) con respecto a la corrosión de armaduras por acción de iones cloruro, considerando también dos niveles de relación a/c (0,4 y 0,7) y dos tiempos de curado (7 y 28 días). Los resultados de los análisis fueron verificados separadamente por la combinación de los elementos de elección, generando dos matrices de análisis comparando los tipos de cemento con la relación a/c de 0,4 tanto para 7 días de curado como para 28 días, y dos matrices con los tipos de cemento para relación a/c de 0,7 y tiempos de curado de 7 días y 28 días.

Para optimizar los resultados del presente trabajo, se muestra con detalles los procedimientos de evaluación apenas de la matriz de decisión de los tipos de cemento para relación a/c de 0,4 a los 7 días, que se encuentra en El ítem que sigue. Para las otras matrices, se eligió demostrar apenas las Tablas finales con los índices de desempeño y evaluación final. Así queda claro para El lector la forma de llegar a los análisis finales por AHP.

4.1. Elección del cemento para La relación a/c 0,4 y curado de 7 días

Luego de obtener el conocimiento de los criterios considerados en el AHP y establecer los pesos para comparación de esas propiedades, El evaluador debe realizar La normalización de los datos para la debida verificación del desempeño. Para eso se divide el valor de cada aspecto por El mayor valor de La línea, a fin de que todos los criterios presenten la misma importancia de valores, comprendida entre 0 y 1.

Los valores de los ensayos relacionados a absorción de agua y el potencial de corrosión precisan ser invertidos, ya que cuando son menores los resultados son de mejor desempeño. Al convertir los datos es posible una estandarización del análisis por los mayores valores agregando coherencia a la evaluación. En la Tabla 6 siguen los datos estandarizados y normalizados de los ensayos referentes a absorción de agua (absorción por inmersión, altura de ascensión capilar y absorbtividad), resistencia a compresión y corrosión acelerada (potencial de corrosión).

Tabla 6. Valores modificados y normalizados usados en el AHP

Datos de Análisis		Valores modificados			Valores normalizados		
		CP II	CP III	CP IV	CP II	CP III	CP IV
Criterios	Absorción por inmersión (%)	9,09	8,33	7,69	1,00	0,92	0,85
	Altura ascensión capilar (cm)	0,21	0,29	0,23	0,74	1,00	0,81
	Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	0,79	1,03	0,79	0,76	1,00	0,77
	Resistencia a compresión	34,50	47,52	37,09	0,73	1,00	0,78
	Potencial de corrosión (mV)	0,00259	0,00246	0,00217	1,00	0,95	0,83

Al multiplicar el valor normalizado de cada ítem (Tabla 6) por la importancia relativa de cada criterio (Tabla 4), por el número 100, para obtener valores en porcentaje, fue posible obtener los índices de desempeño de cada uno. Como ejemplo, en la Ecuación (1) sigue descrito el procedimiento de cálculo del índice de desempeño del criterio de absorción por inmersión para el CP II con a/c 0,4 a los 7 días.

$$I_c = V_{ni} \times P_c \times 100 \tag{1}$$

$$I_c = 1,00 \times 0,3333 \times 100$$

$$I_c = 33,33$$

Donde,

I_c: índice de desempeño del criterio

V_{ni}: valor normalizado del criterio

P_c: importancia relativa del criterio

Luego de eso se suman los índices de desempeño de los criterios de comparación correspondientes a absorción de agua. Los índices de desempeño de los criterios de resistencia a compresión y evolución del potencial de corrosión no son sumados, pues cada criterio se trata de un ensayo aislado. En la Tabla 7 siguen los índices de desempeño de los criterios.

Por fin la evaluación final ES La suma de los índices de desempeño multiplicados por la importancia relativa (Tabla 3) de cada propiedad analizada. El procedimiento de cálculo para la evaluación final del CP II sigue ejemplificado por la Ecuación (2).

$$Af = \sum(I_p \cdot P_p) \tag{2}$$

$$Af = (83,62 \cdot 0,20) + (72,60 \cdot 0,20) + (100,00 \cdot 0,60)$$

$$Af = 91,24$$

Donde,

Af: evaluación final

I_p : índice de desempeño de la propiedad

P_p : importancia relativa de la propiedad

Tabla 7. Índices de desempeño para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 7 días de curado

Datos de Análisis		Índices de desempeños		
		CP II	CP III	CP IV
Absorción de agua	Absorción por inmersión (%)	33,33	30,56	28,21
	Altura ascensión capilar (cm)	24,82	33,33	27,13
	Absortividade ($\text{Kg/m}^2\text{h}^{1/2}$)	25,46	33,33	25,66
	Índice de Desempeño	83,62	97,22	81,00
Res. compresión	Resistencia a compresión	72,60	100,00	78,05
	Índice de Desempeño	72,60	100,00	78,05
Corrosión acelerada	Potencial de corrosión (mV)	100,00	95,26	83,99
	Índice de Desempeño	100,00	95,26	83,99

Los resultados de la evaluación de cada tipo de cemento se encuentran descritos en la Tabla 8. El mejor resultado entre las combinaciones de los tipos de cemento, relaciones a/c y tiempos de curado ES lo que presenta El mayor valor en la evaluación final.

Tabla 8. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 7 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Importancia relativa	0,20	0,20	0,60	
CP II	83,62	72,60	100,00	91,24
CP III	97,22	100,00	95,26	96,60
CP IV	81,00	78,05	83,99	82,21

Para el caso estudiado, buscando el mejor tipo de cemento capaz de proteger el concreto tanto de la corrosión de las armaduras sobre La acción de iones cloruro, considerando una relación a/c de 0,4 y tiempo de curado de 7 días, La opción que presento mejor desempeño según el Análisis Jerárquico fue el cemento tipo CPIII-40, seguido del cemento CPII-Z-32 y CPIV-32.

4.2. Elección del cemento para otras combinaciones de a/c y tiempo de curado

Los procedimientos de cálculo demostrados anteriormente, para la elección del tipo de cemento con relación a/c de 0,4 a los 7 días de curado, fueron los mismos adoptados para las otras combinaciones de relación a/c y tiempo de curado. Así, como forma de simplificar la presentación de los resultados, en las Tablas 9, 10 y 11 están colocados los datos de los índices de desempeño y la evaluación final de las otras matrices en análisis.

Tabla 9. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 28 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	84,36	92,41	89,36	88,97
CP III	97,22	100,00	100,00	99,44
CP IV	89,91	87,21	78,09	82,28

Tabla 10. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,7 a los 7 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	80,45	90,04	100,00	94,10
CP III	96,86	100,00	92,17	94,68
CP IV	90,44	77,68	98,35	92,63

Tabla 11. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,7 a los 28 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	76,33	71,38	94,01	85,95
CP III	100,00	100,00	100,00	100,00
CP IV	86,72	64,03	91,84	85,25

Al analizar cada criterio individualmente se constata que en relación a la absorción de agua los mejores desempeños entre los tipos de cemento se destaca el CPIII-40, como identificado con la relación a/c de 0,4 con tiempo de curado de 28 días. Ese resultado se debe a la mejoría de la microestructura de la composición del cemento Portland proporcionada por el prolongamiento del período de curado. En cuanto a La relación a/c, esta influye en la cantidad de vacíos del mortero, siendo ese un parámetro que controla la porosidad influenciando en las propiedades ligadas a los mecanismos de transporte en el concreto (MENDES et al., 2010).

Ya en relación a La resistencia a la compresión se confirmó, por el Análisis Jerárquico, lo esperado: la resistencia a compresión tiende a aumentar a medida que disminuye la relación agua/cemento (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Se observó que para las muestras, de cemento CPIII-40 se obtuvo mayores valores de resistencia, debido a la propia escoria de alto-horno que compone el material. Pereira (2011) al realizar la caracterización de los materiales también percibió que ese tipo de cemento fue o que demostró ser más fino en relación a los otros estudiados, lo que trae como consecuencia una mayor reactividad del cemento.

Evalutando los resultados finales de los ensayos de corrosión acelerada se noto nuevamente que en todas las matrices analizadas la elección del mejor tipo de cemento corresponde al CPIII-40, seguido del cemento CPII-Z-32 y CPIV-32. Eso viene concordando con las afirmaciones de Tumidajski y Chan (1996), de que concretos que incorporan escoria de alto-horno en sustitución parcial del cemento Portland, son más eficientes en prevenir la penetración de iones cloruro en comparación con concretos dosificados con cementos comunes.

Por fin, se constato que para las probetas fabricadas con el cemento CPIII-40, que fue escogido en todas las matrices analizadas, los valores de la relación agua/cemento resultaron en efectos relativamente semejantes, y a favor de la protección del concreto a la corrosión por ataque de cloruros. En relación al curado, El tiempo prolongado también favoreció el CPIII-40 en la protección del concreto.

Este trabajo fue realizado teniendo como base de datos el trabajo de maestría de Pereira (2011) y se debe destacar que la aplicación de la AHP sería más completa si el banco de datos comprendiera datos de velocidad de corrosión y hasta otro indicativo de corrosión de armaduras como aparición de manchas de corrosión en la superficie del concreto. Por tanto, este trabajo muestra que la AHP ES un sistema abierto a la inclusión de otros parámetros, lo que puede enriquecer el resultado de la elección.

5. CONCLUSIONES

La aplicación del Análisis Jerárquico como una herramienta para tomar de decisiones presento ventajas como facilidad de aplicación del método, y la posibilidad de manipular los factores determinantes en una elección, forneciendo resultados claros y objetivos. El AHP permite la construcción de jerarquías que consideran múltiples variable y admiten la comparación y evaluación de criterios priorizando los resultados.

En relación al presente trabajo, la aplicación del AHP facilitó la elección del tipo de cemento capaz de proteger al concreto de La corrosión de las armaduras sobre acción de iones cloruro, considerando también diferentes relaciones agua/cemento y tiempos de curado.

Evaluated los criterios de elección, a través de los ensayos de absorción de agua, resistencia a compresión y corrosión acelerada ejecutados por Pereira (2011), se constato que el cemento CPIII-40 fue El que presentó el mejor desempeño en todas las combinaciones estudiadas en este

trabajo. Ya de acuerdo con el tiempo de curado el mejor desempeño del cemento escogido fue a los 28 días, como era esperado debido AL mayor grado de hidratación.

Es relevante destacar que las importancias relativas de los criterios considerados fueron establecidas por los autores en base a la literatura y La Tesis de Pereira (2011). La intención de este trabajo es demostrar la utilidad y aplicación del AHP, cuando involucra una toma de decisión entre diversas posibilidades y combinaciones que involucran los estudios de corrosión de armaduras por acción de iones cloruro en el concreto.

Así, para la presente investigación, se confirma que el Análisis Jerárquico demostró ser eficiente para la sistematización de La escogencia de un nuevo análisis de los resultados obtenidos en la tesis de Pereira (2011). Las variables a ser consideradas en sus respectivos pesos pueden ser discutidas en trabajos futuros, visando aprimorar el método desarrollado en este trabajo. Un punto de mejora que ya puede ser sugerido en el método e implementar en el AHP algún parámetro que considere la velocidad de corrosión.

6. REFERENCIAS

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 876*: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete – (1999 reapproved 2009). Annual Book of ASTM Standard, 2009.

_____. *ASTM E 1765*: standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to buildings and buildings systems. 2011.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: Cemento Portland - determinacao da resistencia a compresión. Rio de Janeiro, 1997.

_____. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinacao da absorción de agua por inmersión, índice de vacíos e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinacao da absorción de agua por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introducao*. Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CERVO, T. C. *Influencia da finura e do teor de puzolana na penetracao de cloruros e na solución aquosa dos poros do concreto*. Dissertacao de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.

COSTA, H. G. *Introducao ao Método de Análisis Jerárquica*: análisis multicriterio no auxilia a decisión. 1 ed. Niterói, 2002.

DOTTO, J. MR. *Corrosión do acero induzida por iones cloruro – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema acero-concreto como e sem puzolana*. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; SACILOTO, A. P.; MISSAU, F.; HOPPE, T. F. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing Rice husk ash: A technical and economical feasibility study. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 783-793, 2010.

HELENE, P. Contribuicao ao estudo da corrosión em armaduras de concreto armado. Sao Paulo, 1993. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo.

HO, W. Integrated analytic hierarchy process and its applications – a literature review. *European Journal of Operational Research*, v. 186, p. 211-228. 2008.

- HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, p. 411-418, 2013.
- LAI, Y.; WANG, W.; WANG, H. AHP and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects. *Automation in Construction*, v. 17, n. 5, p. 623-632, 2008.
- LISBOA, M. V.; WAISMAN, J. Multicriteria analysis in the selection of urban highway alignment alternatives with application of the Analytic Process. An environmentally sustainable approach. In: Urban transport, XII, Anais. 2006, Praga.
- MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. Aplicación do método de AHP para a hierarquizacao das alternativas de tratamento de residuos sólidos domiciliares. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 173-187, 2011.
- MATTANA, A. J.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. M. M. Análisis Jerárquica para elección entre agregado natural ou areia de britagem de rocha para confeccao de argamassas de revestimento. *Ambiente Construído*, v. 12, p. 63-79, 2012.
- MATHER, B. Concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 3-4, 2004.
- MEDEIROS, M. H. F. *Contribuicao ao estudo da durabilidade de concretos com proteccion superficial frente a acao de iones cloruros*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Construcción Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F.; BALBINOT, G. B.; HELENE, P.. Inspecao em prédios no Rio de Janeiro: corrosión em pilares. *Concreto & Contrucao*, v. Ano 38, p. 58-66, 2010.
- MEDEIROS, M. H. F.; KNUUTILA, M.; PEREIRA, E.; HELENE, P. Inspection of Buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosión at the base of reinforced concrete columns using potential corrosión technique. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, v. 2, p. 102-112, 2013.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propiedades e materiais*. 3. ed. Sao Paulo: IBRACON, 2008.
- MENDES, M. V. A. da Silva; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; FERREIRA, R. B. Evaluación das propiedades de transporte massa em concretos contendo adiciones minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: IBRACON, 2010.
- MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. Corrosión de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de iones cloruro. 54º Congresso Brasileiro de Concreto. *Anais...* Maceió, 2012.
- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosión of reinforcing steel. *Cement and Concrete Research*, v. 16, p.79-86, 1986.
- PAN, N. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction*, v. 17, n. 8, p. 958-965, 2008.
- PEREIRA, V. C. O. *Estudo da influencia do tipo de cimento em relación a corrosión de armaduras sob acao de iones cloruros*. Dissertacao (Mestrado em Engenharia – Construcción Civil), Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica de Pernambuco. Recife, 2011.
- PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F.; LEVY, S. M. Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicación de análisis Jerárquica. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 3, p. 125-134, 2012.
- PEREIRA, E.; RESENDE, A.; MEDEIROS, M. H. F.; MENEGUETTI, L. C. Ensayo acelerado por cloruros: efeito da sílica ativa, relación agua/aglomerante e espessura de cobrimento do concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 6, n. 4, p. 561-581, 2013.

- PEREIRA, E.; MARTINS, L. A.; MEDEIROS, M. H. F.; COSTA, M. R. M. M. Análisis Jerárquica para a elección de argamassa colante aplicada no assentamento de piso sobre piso. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, p. 203-214, 2014.
- ROCHA, F. C. *Leituras de potencial de corrosión em estruturas de concreto armado: influencia da relación a/c, da temperatura, da contaminacao por cloruros, da espessura de cobrimento e do teor de humedades do concreto*. Dissertacao (Mestrado em Engenharia de Construcción Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. Norte da Holanda, v. 48, p. 9-26. 1990.
- SAKR, K. Effect of cement type on the corrosión of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1820–1826, 2004.
- SILVA, F. J. A.; SOUZA, R. O. AHP na selección de caminheiros coletores-compactadores de residuos sólidos. *Acta Scientiarum Technology*, v. 33, n. 3, p. 259-264, 2011.
- TESSARI, R. *Estudo da capacidade de proteccion de alguns tipos de cements nacionais, em relación a corrosión de armaduras sob acao de iones cloruro*. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- TUMIDAJSKI, P. J.; CHAN, G. W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 4, p.551-556, may. 1996.
- ZAYED, T; AMER, M; PAN, J. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. *International Journal of Project Management*, v. 26, n. 4, p. 408-419, 2008.



Caracterización química y físico-mecánica de cementos adicionados de filer calizo en Venezuela

H. Bolognini¹, N. Martínez¹, O. Troconis de Rincón²

¹ Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Capítulo Venezuela, hbolognini@ucla.edu.ve

² Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, Centro de Estudios de Corrosión oladis1@yahoo.com

Información del artículo

Artículo recibido el 15 de Marzo de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 22 de Agosto de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

RESUMEN

En los últimos años en Venezuela, se ha presentado una crisis sobre la demanda, comercialización y producción del cemento, principal material de construcción. En este trabajo se presentará la caracterización química y físico- mecánica realizada a las principales marcas comerciales de cementos adicionados en el país, caracterizándolos de acuerdo a: composición química, finura Blaine, tiempo de fraguado y resistencia mecánica a compresión. Los resultados demuestran que estos cementos no cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la norma venezolana para su uso en la elaboración de concreto estructural.

Palabras clave: Cemento Adicionado, Corrosión, Concreto Armado.

ABSTRACT

In recent years in Venezuela, there has been a crisis on demand, production and marketing of cement, primary building material. In this work the chemical and physical mechanical characterization made a Top Trademark blended cements in the country, characterizing them according to: chemical composition, Blaine fineness, setting time and compressive strength. The results show that these cements do not meet the minimum requirements established in the Venezuelan standard for use in the manufacture of structural concrete.

Keywords: Blended cement, Corrosion, Reinforced Concrete.

RESUMO

Nos últimos anos na Venezuela, tem-se apresentado uma crise sobre a demanda, comercialização e produção de cimento, um dos principais materiais de construção. Este artigo apresentará a caracterização química e físico-mecânica realizada nas principais marcas de cimentos com adições comercializados no país, caracterizando-os de acordo com a sua composição química, finura Blaine, tempo de pega e resistência à compressão. Os resultados demonstram que estes cimentos não cumprem com os requisitos mínimos estabelecidos na norma venezuelana para a sua aplicação na elaboração de concreto estrutural.

Palavras-chave: Cimento com adições, Corrosão, Concreto Armado.

Autor de correspondencia: Humberto Bolognini

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Venezuela, se ha presentado una crisis sobre la demanda, comercialización y producción del cemento, principal material de construcción, específicamente para la fabricación de concreto. Esto ha llevado a los fabricantes a buscar alternativas para cubrir esta demanda creciente, por lo cual se ha incluido a la oferta comercial de este material los denominados cementos adicionados; siendo éstos tipo portland con adición de calizas, cuya concentración varía entre 15 y 30% en base al peso de cemento.

Aunque la producción de cementos adicionados es un fenómeno mundial que busca, entre otras cosas, reducir el impacto ambiental de la producción de cemento portland y disminuir las emanaciones de CO₂ en la industria de la construcción, en Venezuela se ha evidenciado el uso indiscriminado de este producto; ya que no se han considerado las limitaciones técnicas de estos tipos de cemento, fundamentalmente en lo referente a la resistencia mecánica y su comportamiento ante la corrosión del concreto armado. Esto último motivado a nuestra hipótesis sobre la base de la composición química de estos cementos, lo que prevé no solo una menor reserva alcalina lo que haría que fuese menos resistente a la acción de agentes ambientales, en específico la carbonatación, sino a su incapacidad de garantizar resistencias mecánicas adecuadas para diseños de mezclas convencionales.

Los cementos adicionados (o compuestos), son mezclas de clinker de cemento Portland, sulfato de calcio (yeso) y adiciones. Estos cementos pueden ser producidos por molienda conjunta de esos componentes o por la mezcla de los componentes finamente molidos (Salamanca 2000). Los cementos adicionados tipo CPCA 1 y CPCA 2, están formulados para su uso en la producción de concretos y morteros que requieren mejorar la trabajabilidad, capacidad de retención de agua, resistencias adecuadas a su uso y mayor durabilidad (Salamanca 2000). De acuerdo a la norma Venezolana COVENIN (COVENIN 3134-2004/ASTM C-150), el CPCA 1 es aquel cuyo contenido de caliza u otro material calcáreo es menor o igual al 15 % del peso total. En cuanto al CPCA 2, se indica que el contenido de caliza u otro material calcáreo es mayor al 15 % y menor o igual al 30 % del peso total.

Como ya se ha mencionado es de gran importancia conocer la naturaleza y las características físico mecánicas de estos cementos, puesto que de ellas dependerá el logro de las condiciones establecidas para su uso como concreto estructural que permitan garantizar un concreto resistente y durable. Los problemas surgidos por el uso inadecuado de concretos elaborados con distintos tipos de cementos sin tomar medidas de precaución, hacen necesario profundizar en el conocimiento de los materiales a utilizar y los productos de transformación generados en la fabricación de concretos.

La legislación venezolana no designa condiciones particulares para las características de estos cementos con adiciones de caliza, y no regula los requerimientos químicos como lo hace con un cemento portland normalizado. Para los cementos adicionados la norma COVENIN 3134-04 /ASTM C-150 establece los requisitos físicos, químicos y mecánicos mínimos a ser cumplidos, exigiendo como requisitos físico-mecánicos los mismos establecidos para cementos portland tipo I y en referencia a los requisitos químicos sólo tres parámetros entre los cuales se encuentran: pérdida al fuego, residuos insolubles y contenido de trióxido de azufre (SO₃). Sin embargo, estos componentes no son los únicos que garantizan la calidad del cemento. Por esta razón se correspondería aplicar para los cementos adicionados los parámetros químicos existentes en la norma vigente COVENIN 109-90/ASTM C-114, la cual contempla los métodos de ensayo que se emplean para efectuar los análisis químicos de cementos hidráulicos, fundamentales para la determinación a través del método de Bogue de los componentes químicos principales: silicato

tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, aluminato ferritotetracálcico. Por todo esto, se requiere con urgencia determinar las limitaciones técnicas sobre el uso de estos cementos en la fabricación de concreto para elementos estructurales, lo cual indudablemente contribuirá a mejorar la durabilidad de las edificaciones del país. Así, el presente trabajo se orienta en la determinación de las características químicas y físico-mecánicas de los cementos adicionados de las distintas empresas que elaboran este material en Venezuela, que permitan estimar su comportamiento como concreto estructural.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados fueron los siguientes: Cemento Portland Tipo I, Cemento Adicionado con filer calizo CPCA de seis diferentes empresas del país (identificados como CEMA, CEMCA, CEMCO, CEMLI, CEMVEN y CEMMA), arena de sílice normalizada cumpliendo la norma Venezolana COVENIN 2503/ASTM C-778, Para el diseño de mezcla se empleó el recomendado por la ACI 211.

Para la evaluación de las propiedades químicas y físico-mecánicas se utilizaron los criterios de validación para cementos con adiciones descritos en la Norma COVENIN 3134-04 (ASTM C-150), mediante los siguientes ensayos: análisis químico (COVENIN 109-90/ASTM C-114); finura Blaine (COVENIN 487/ASTM C-204); tiempo de fraguado (COVENIN 493:1992/ASTM C-191) y resistencia a la compresión (COVENIN 484:1993/ASTM C-109). En relación al número de muestras en cada ensayo se utilizó, como mínimo, la cantidad establecida en cada normativa.

Para el análisis químico de cementos adicionados, la norma COVENIN 109-90/ASTM C-114 establece que se deben usar crisoles de platino. Una de las limitaciones de este trabajo fue la no disposición de estos crisoles, por lo que se decidió trabajar con crisoles convencionales cerámicos con una capacidad entre 15 cm³ y 30 cm³.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización físico-mecánica del cemento adicionado CPCA:

Se presentan los resultados más relevantes de la caracterización físico-mecánica realizada a seis marcas comerciales de cementos tipo CPCA fabricados en Venezuela.

En la Tabla 1 se muestran los resultados promedios de la finura mediante el permeabilímetro de Blaine, de seis (6) muestras por cada tipo de cemento ensayado en relación a la finura de un cemento normalizado. En esta tabla se observa que en todos los casos evaluados, los valores de finura determinados de los Cementos Portland con Adiciones CPCA superan el valor normativo mínimo establecido (3000 cm²/gr); lo cual además indica una mayor superficie específica para una mejor hidratación a la superficie específica requerida para su hidratación.

Es importante resaltar que una de las últimas etapas en la fabricación de cemento es la mezcla del clinker molido con el sulfato de calcio hidratado. Ahora bien dado que la hidratación comienza sobre la superficie de los granos de cemento, su área superficial constituye el material de hidratación. De este modo, la velocidad de hidratación depende de la finura de las partículas del cemento; por lo tanto, para un desarrollo rápido de la resistencia se precisa un alto grado de finura. No obstante, moler las partículas del cemento para obtener más finura representa un costo considerable. Lo requerido es que el cemento alcance sus debidas resistencias, a las distintas edades por razón de calidad de clinker más bien que por razón de finura de molido.

Tabla 1. Resultados de la determinación de la Finura (superficie específica) de los Cementos Portland con Adiciones CPCA, Valor Normativo (mínimo) de 3000 cm²/gr.

DETERMINACIÓN DE LA FINURA BLAINE (SUPERFICIE ESPECIFICA)	
TIPO DE CEMENTO	FINURA
CEMA	3534,06 cm ² /gr
CEMCA	3602,17 cm ² /gr
CEMCO	3093,08 cm ² /gr
CEMLI	3827,47 cm ² /gr
CEMVEN	3246,46 cm ² /gr
CEMMA	3588,06 cm ² /gr
PORTLAND I	3867,06 cm ² /gr

Cabe destacar que en Venezuela los cementos usuales se muelen a una finura Blaine del orden de 2800 a 3500 cm²/gr. Cuando se sobrepasan los 4000 cm²/gr, y dependiendo de la composición química del cemento, pueden presentarse en el concreto problemas secundarios, como son dificultades de mezclado y mayor retracción. De tal manera que estos resultados se consideran aceptables, debido a que los valores obtenidos de los cementos Portland con Adiciones CPCA en estudio, superan el mínimo establecido según la Norma COVENIN 3134:2004, sin exceder a valores de finura inadecuados (> 4000 cm²/gr).

En la Tabla 2 se muestran los resultados promedios de nueve (9) muestras por cada tipo de cemento ensayado obtenidos de la determinación del tiempo inicial y tiempo final del fraguado de la pasta de cemento. Como es bien conocido, el tiempo de fraguado es aquel en el cual un aglomerante cambia su plasticidad inicial a un estado pétreo; siendo esta una propiedad fundamental para este tipo de materiales, motivado a que establece el tiempo promedio de trabajabilidad y colocación sin afectar el desarrollo de sus propiedades finales. En esta tabla se observa que para los cementos Portland con adiciones CPCA, en todos los casos evaluados, los valores de tiempo inicial mínimo de fraguado determinados no alcanzan el valor normativo establecido. Esto tiene como resultado la no conformidad de esta característica del material, infiriendo además potenciales dificultades en la fabricación de concretos y morteros dado el poco tiempo de fraguado determinado. Caso contrario al comportamiento del cemento control Portland Tipo I el cual arrojó resultados acordes a los esperados.

Aunque las características antes mencionadas reflejan de cierta manera que el cemento evaluado presenta discrepancias con los valores normativos a satisfacer, en la práctica constructiva la calidad de un cemento es medida sobre la base de la resistencia a la compresión que es capaz de desarrollar una vez fraguado y endurecido; siendo esta característica mecánica el principal factor de evaluación del aglomerante. Por lo tanto, se evaluó esta propiedad a los cementos estudiados; confeccionando 18 probetas cubicas de mortero de cemento (cemento a evaluar y arena de sílice normalizada) de 50,8 mm de lado para cada tipo de cemento y a cada edad de ensayo (7 y 28 días).

Tabla 2. Resultados de la caracterización de los Cementos Portland con Adiciones CPCA, Determinación del tiempo de fraguado.

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO				
Cemento	Tiempo Inicial (min)	Tiempo Final (min)	Valor Normativo	
			Tiempo Inicial mínimo (min)	Tiempo Final máximo (min)
CEMA	30	255	45	480
CEMCA	30	165	45	480
CEMCO	40	180	45	480
CEMLI	40	165	45	480
CEMVEN	15	240	45	480
CEMMA	15	240	45	480
PORTLAND I	90	290	45	480

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para dicho ensayo, obteniendo en general resultados que confirman el no cumplimiento de los valores normativos para los cementos evaluados.

Tabla 3. Resistencia a la compresión de cementos Portland con Adiciones CPCA, 7 y 28 días.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CEMENTOS CON ADICIONES CPCA							
(kg/cm²)							
Cemento	CEMAN	CEMCA	CEMCO	CEMLI	CEMVE	CEMMA	PORTLAND I
7 días (Promedio)	117,73	149,06	46,29	93,06	127,75	132,89	296,63
desviación	+/- 4,50	+/- 4,00	+/- 7,76	+/- 3,88	+/- 4,83	+/- 3,43	+/- 3,21
28 días (Promedio)	145,12	213,45	178,45	176,87	216,85	157,77	394,08
desviación	+/- 5,03	+/- 4,07	+/- 4,83	+/- 3,76	+/- 4,14	+/- 4,73	+/- 4,03

Al observar los resultados, se evidencia que la resistencia ensayada promedio más baja para la edad en estudio (7 días) viene dada por el Cemento CEMCO con un valor de 46,29 kg/cm², mientras que la más alta la proporciona el Cemento CEMCA (149,06 kg/cm²), No obstante, ninguno de los cementos evaluados alcanzó los 170 kg/cm²; valor recomendado según la Norma COVENIN 3134:2004/ASTM C-150 para los cementos Portland con Adiciones CPCA1. Igual comportamiento se obtuvo al evaluar la resistencia a la compresión a los 28 días donde ninguno de los cementos evaluados alcanzó el valor normativo esperado de 280 kg/cm² valores; estos superados por el cemento control Portland Tipo I. Esto, indudablemente que compromete su desempeño como concreto estructural. Si se parte de la premisa que el material no posee las condiciones mínimas, su evolución no debería alcanzar los valores esperados. Es por ello que se consideró caracterizarlos químicamente; para así determinar los compuestos que están contribuyendo a que no se alcancen altas resistencias a la compresión.

3.2. Caracterización química de los componentes mayoritarios y minoritarios de los cementos adicionados CPCA.

3.2.1 Componentes mayores de los cementos adicionados

Dióxido de Silicio (SiO_2): En este ensayo se llevó a cabo la doble calcinación de la muestra, y el residuo que se deriva de este estudio se utilizó posteriormente en la determinación del grupo de los hidróxidos de amonio. La Figura 1 presenta el promedio de los resultados obtenidos.

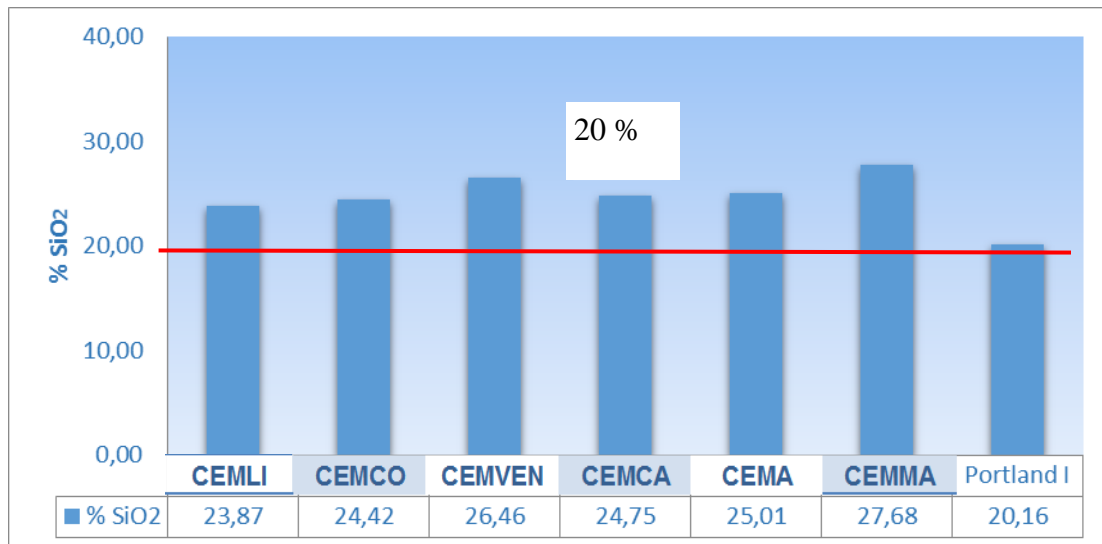


Figura 1. Porcentaje de SiO_2 en los diferentes cementos evaluados.

Los valores obtenidos indican que para el cemento Portland I se obtuvo un valor de 20,16% y todas las demás muestras poseen más del 20% de dióxido de silicio que es el parámetro establecido como mínimo en la norma COVENIN 28-93/ASTM C-150 para el cemento Portland tipo II; ya que para el Portland I la norma no especifica el contenido de este compuesto. Todos los valores se encuentran en un rango entre 20% y 30% siendo el de más bajo porcentaje el cemento Portland tipo I.

Oxido de Aluminio (Al_2O_3): En esta determinación, como lo indica la norma COVENIN 109-90/ASTM C-114, se le resta al valor obtenido del estudio de hidróxido de amonio la cantidad de óxido férrico. Todos los ensayos cumplieron con el parámetro de variación permitido por la norma para asegurar la confiabilidad del ensayo. Los resultados totales de % de Al_2O_3 se muestran en la Figura 2.

Los resultados obtenidos indican que todas las muestras están por encima del valor aceptado por la norma para cementos Portland tipo II, la cual debe ser menor al 6%. Las muestras de Portland tipo I y CEMLI son las más cercanas a este valor de 6,8% y 8,3%, respectivamente; Por su parte, el CEMCO y el CEMVEN son los que poseen el mayor porcentaje de Al_2O_3 (20,15% y 19,96%, respectivamente). Porrero (2004) hace referencia que los valores para este parámetro de los cementos Portland están entre 3,5 y 8% con lo cual los cementos adicionados sobrepasan este parámetro.

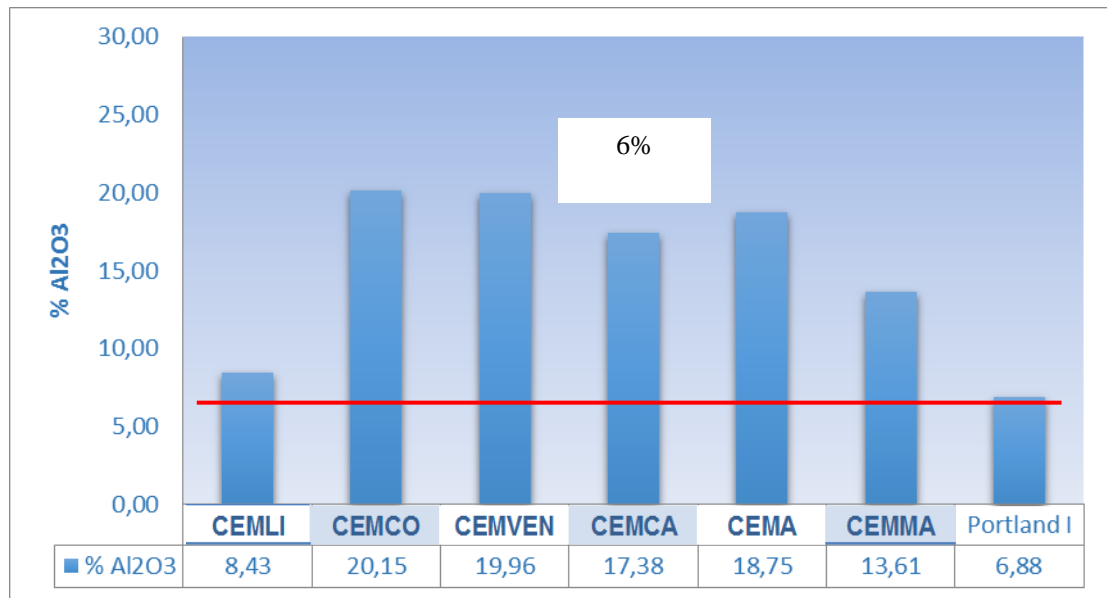


Figura 2. Porcentaje de Al₂O₃ en los diferentes cementos evaluados.

Oxido Férrico (Fe₂O₃): Los porcentajes de óxido férrico para cada una de las muestras estudiadas se detallan en la Figura 3.

Todas las muestras analizadas se encuentran por debajo del valor máximo estipulado en la norma COVENIN 28-93/ASTM C-150; siendo la muestra de cemento CEMA la que mayor porcentaje de óxido férrico presenta con 5,10% y la muestra de cemento CEMLI es la que posee el porcentaje más pequeño de este componente con 3,18%.

Oxido de Calcio (CaO): Los resultados del ensayo se ajustan a la diferencia de 0,2 entre los duplicados que permite la norma COVENIN 109-90. La Figura 4 presenta los resultados obtenidos del % de óxido de calcio.

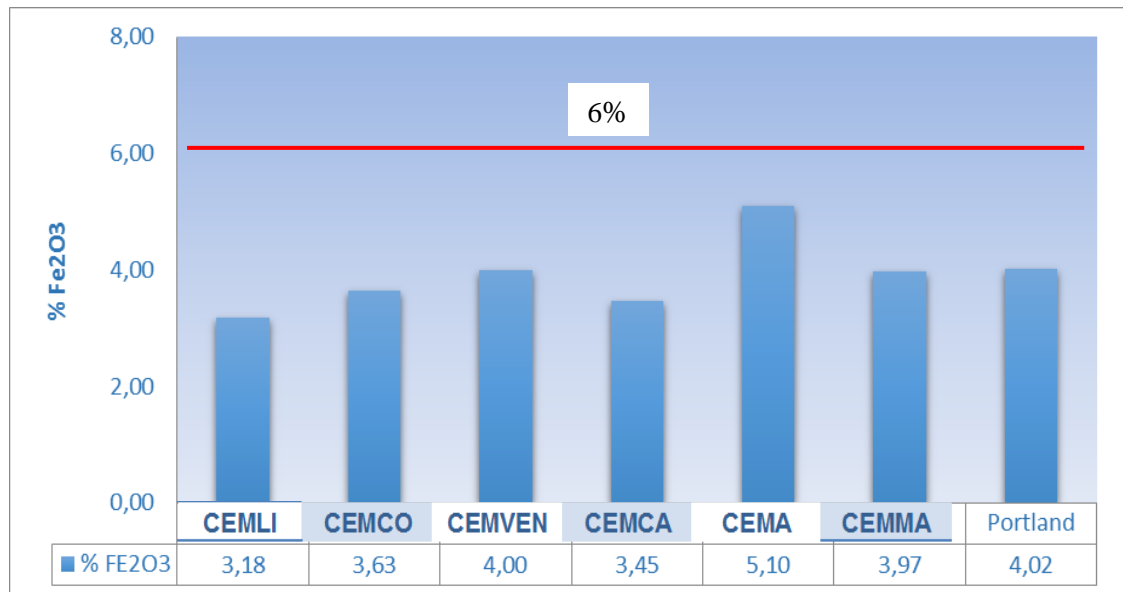


Figura 3. Porcentaje de Fe₂O₃ en los diferentes cementos evaluados.

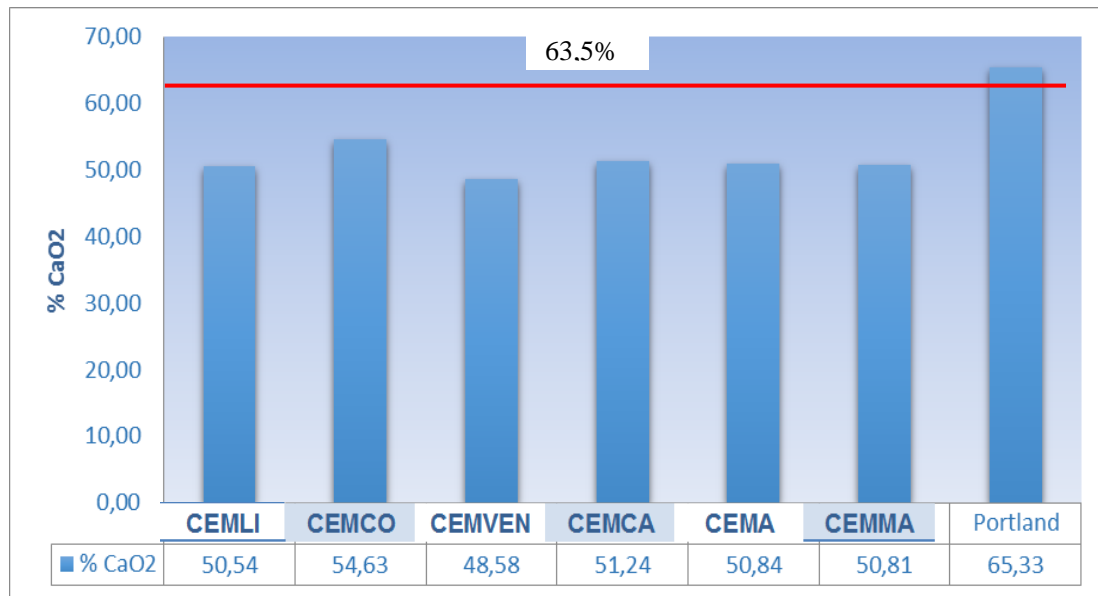


Figura 4. Porcentaje de CaO en los diferentes cementos evaluados.

Este ensayo no posee un valor normalizado para comparar, sin embargo Porrero (2004) indica valores entre 60% y 67% CaO para cementos Portland tipo I de excelente calidad; estando los cementos adicionales evaluados por debajo de estos valores, entre 48,58 % y 54,63 %.

Oxido de Magnesio (MgO): Este ensayo se realiza con los filtrados de la determinación de Oxido de Calcio, y para este se obtuvieron los valores que se muestran en la Figura 5.

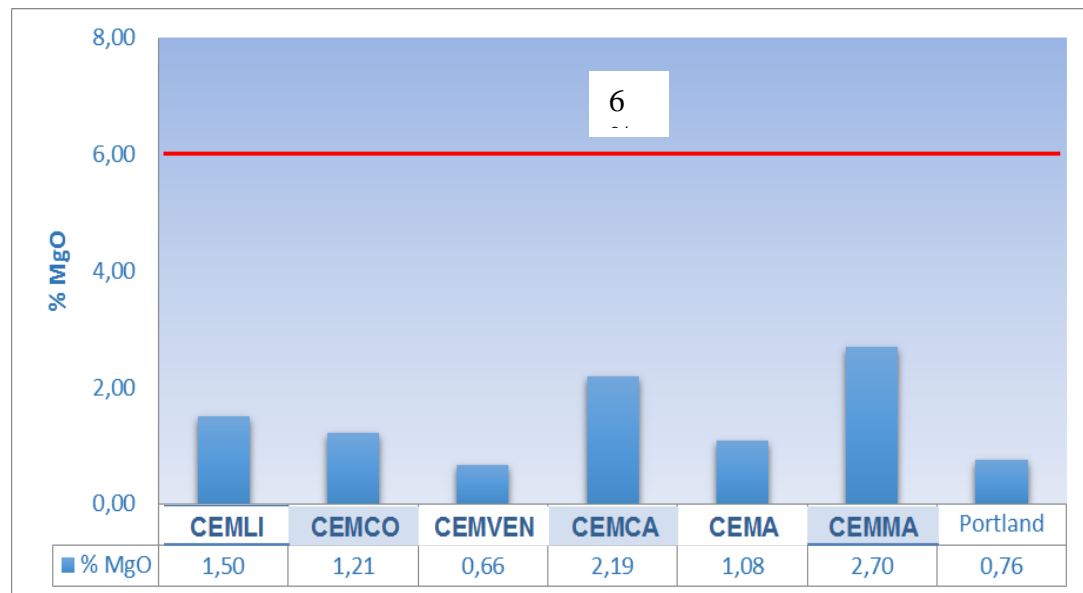


Figura 5. Porcentaje de MgO en los diferentes cementos evaluados.

Todos los valores se encuentran por debajo del límite (6%) estipulado en la norma COVENIN 109-90/ASTM C-114. Se observa que los porcentajes de Oxido de Magnesio están comprendidos entre 0,66% para la muestra de CEMVEN y 2,70% para la muestra CENMA.

Trióxido de Azufre (SO₃): Los resultados obtenidos para los valores duplicados se pueden observar en la Figura 6.

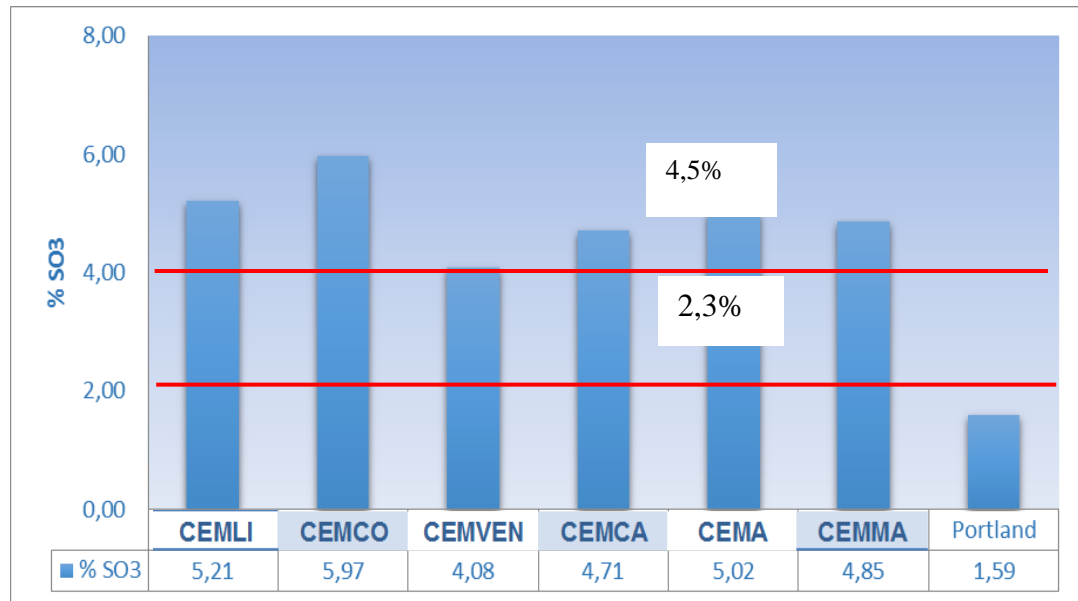


Figura 6. Porcentaje de SO₃ en los diferentes cementos evaluados.

Los requisitos químicos establecidos en la norma COVENIN 28-93/ASTM C-150 establecen el porcentaje de Trióxido de Azufre presente en cementos tipo portland no mayor a un rango entre 2,3% y 4,5%. La Figura 6 muestra que solo el CEMVEN (4,08%) y el Portland (1,59%) cumplen con esta norma, ya que el resto de las muestras contienen mayores cantidades, comprendidas entre 4,85% y 5,97%.

3.2.2 Ensayos especiales

Pérdida al fuego (P.F) del cemento: Este ensayo representó uno de los más sencillos a realizar debido a que solamente se calcinaba la muestra a 950 °C procediendo luego a calcular la diferencia de peso. La Figura 7 muestra los porcentajes de pérdida al fuego obtenidos en el ensayo.

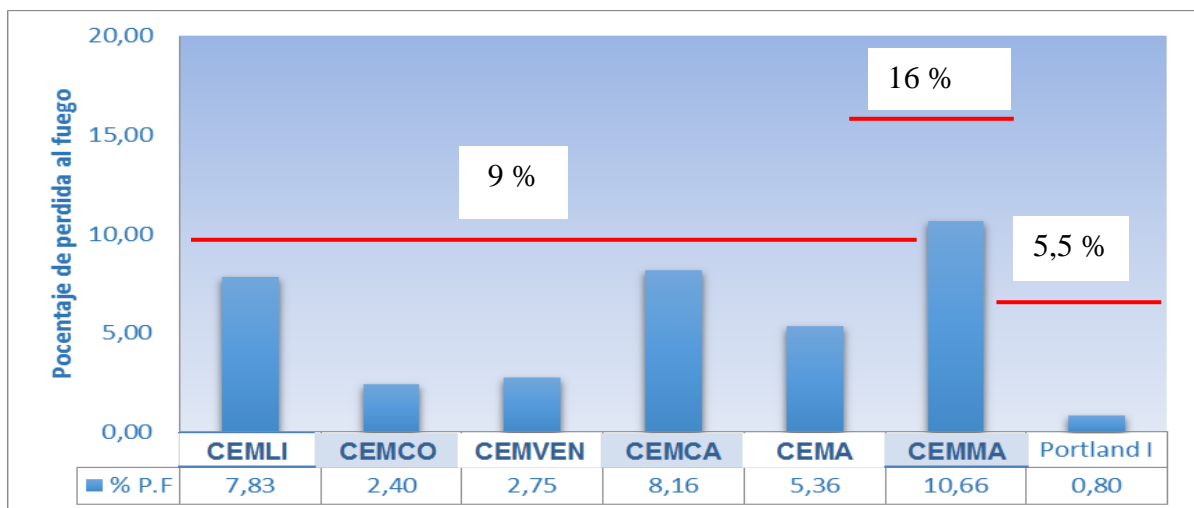


Figura 7. Porcentaje de pérdida al fuego de los diferentes cementos evaluados.

Todas las muestras analizadas cumplen con los parámetros establecidos por las normas COVENIN. Para cementos CPCA1 los valores deben ser menores al 9%, para CPCA2 menores al 16% y para cementos Portland tipo I la pérdida al fuego debe ser menor al 5,5%. Los cementos CEMLI y CEMCA con 7,83% y 8,16%, respectivamente, presentan los mayores porcentajes de P.F en comparación con las demás muestras.

3.2.3 Componentes menores

Oxido de Sodio (Na_2O) y Oxido de potasio (K_2O).- Para la determinación de este componente se realizó en todas las muestras una dilución 1:10 para que la lectura entrara en la recta de calibración del fotómetro de llama. La curva de calibración para la determinación se en la Figura 8.

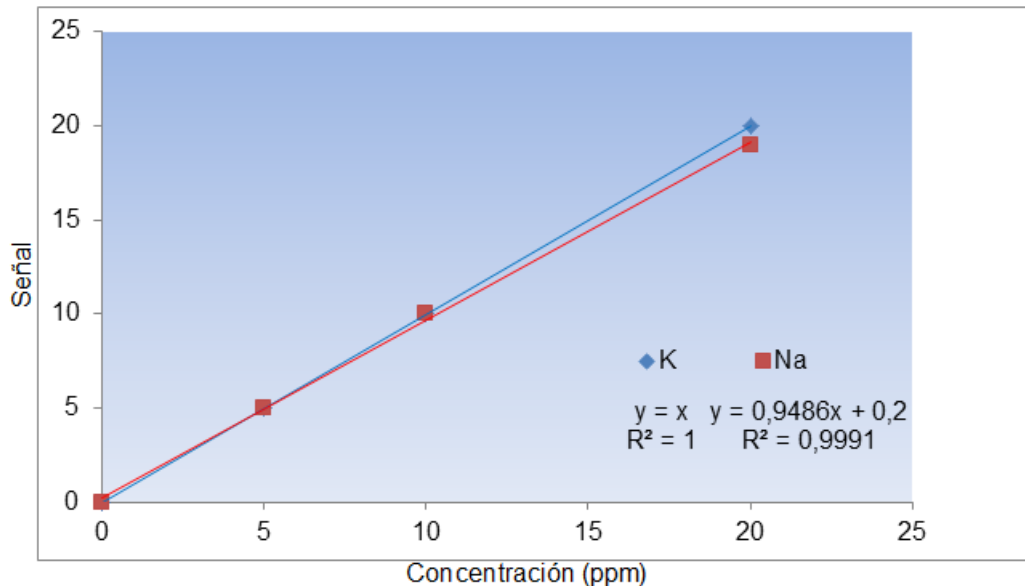


Figura 8. Curva de calibración para la determinación del Na y K en los diferentes cementos evaluados.

Como se observa en la Figura 8 tanto el Na como el K muestran un excelente índice de linealidad. Los resultados obtenidos (Tabla 4) para los valores límites de duplicados indican que todas las concentraciones de Na están por debajo de la desviación máxima permitida que es de 0,03%. En cuanto al K, el 72 % de los resultados se encuentran por debajo de 0,03% que es el valor aceptado, solo CEMCO Y CENMA no cumplen, con un porcentaje de 0,04%; sin embargo, no duplican el límite aceptado con lo cual cumplen con la norma.

La Tabla 4 también indica que el mayor % de Na_2O lo presenta el cemento CEMVEN con 0,17% y el menor CEMLI, CEMCO Y CEMA con 0,11%. Por su parte el cemento Portland presenta un 0,16% de Na_2O que se encuentra en el rango antes mencionado. El mayor % de K_2O lo presentan los cementos CEMVEN Y CEMA con 0,67% y el menor el CEMCO con 0,31%. Por su parte el cemento Portland presenta un 0,52% de K_2O que se encuentra en el rango antes mencionado.

Tabla 4. Resultados obtenidos en la determinación de Na₂O y (K₂O) en los diferentes cementos evaluados.

Muestra	σ^*Na	σ^*K	N.C 109-90**	%Na ₂ O***	%K ₂ O***
CEMLI	0,00	0,02	0,03	0,11	0,38
CEMCO	0,00	0,04	0,03	0,11	0,31
CEMVEN	0,00	0,00	0,03	0,17	0,67
CEMCA	0,01	0,02	0,03	0,12	0,36
CEMA	0,00	0,00	0,03	0,11	0,67
CEMMA	0,01	0,04	0,03	0,12	0,45
Portland I	0,00	0,00	0,03	0,16	0,51

* Desviación estándar entre duplicados, ** Norma COVENIN 109-90/ASTM C-114, *** Media aritmética del %.

3.2.4 Residuo Insoluble (R.I).

En este caso de estudio más del 70% de los ensayos por duplicado cumple con el parámetro establecido por la norma COVENIN 109-90/ASTM C-114; ya que la variación de dichos ensayos no es mayor a 0,1%, solo en las muestras de CEMAN y Portland I se obtuvieron porcentajes mayores, de 0,12% y 0,15%, respectivamente. La Figura 9 muestra estos resultados.

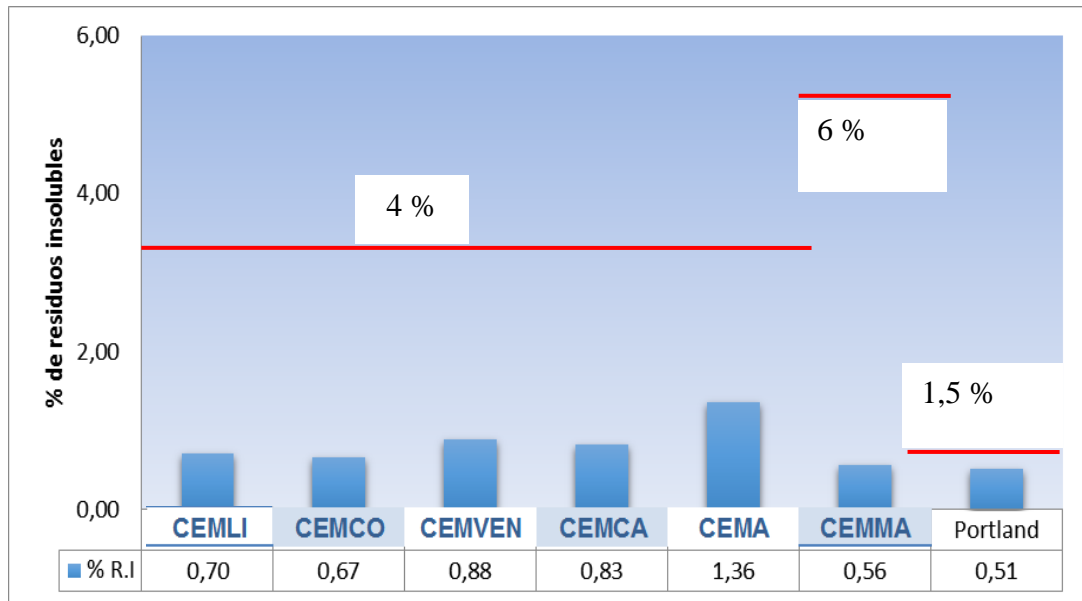


Figura 9. Porcentaje de residuos insolubles en los diferentes cementos evaluados.

En base a los resultados obtenidos se observa que todas las muestras cumplen con los parámetros establecidos por las normas COVENIN en cuanto a residuos insolubles como lo es para cementos CPCA1 porcentajes menores a 4 % para CPCA2 menores al 6% y para cemento Portland tipo I un porcentaje menor al 1,5%. Entre los datos se puede observar que en su mayoría el % R.I de las muestras se encuentra por debajo del 1% a excepción del cemento CEMAN el cual superó por poco el 1%. Si todas las muestras se compararan respecto a la norma COVENIN 3134-04/ASTM C-150 para cemento Portland también cumplirían a cabalidad con este parámetro.

La Tabla 5 muestra todos los resultados de la caracterización química de los diferentes cementos evaluados; donde se puede observar, como ya se indicó, que las concentraciones de algunos de estos compuestos se encuentran fuera de lo especificado en las normas COVENIN.

Es importante destacar los altos y bajos contenidos de Óxido de Aluminio y Óxido de Calcio, respectivamente, en la mayoría de los cementos evaluados; lo cual, en las proporciones obtenidas generarán ciertas limitantes para la elaboración de concreto estructural, particularmente lo relacionado con la resistencia a la compresión, la cual en todos los casos siempre fue inferior a la obtenida con el cemento Portland I. La baja proporción CaO no permite la formación de C₃S y el C₂S en cantidad suficiente como para generar una resistencia a la compresión igual o superior a obtenida con el Portland I.

Tabla 5. Características químicas de los cementos adicionados CPCA1 y CPCA2

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.F	K ₂ O	Na ₂ O	R.I
CEMLI	23,87	8,43	3,18	50,54	1,50	5,21	7,83	0,38	0,11	0,70
CEMCO	24,42	20,15	3,63	54,63	1,21	5,97	2,40	0,31	0,11	0,67
CEMVEN	26,46	19,96	4,00	48,58	0,66	4,08	2,75	0,67	0,17	0,88
CEMCA	24,75	17,38	3,45	51,24	2,19	4,71	8,16	0,36	0,12	0,83
CEMA	25,01	18,75	5,10	50,84	1,08	5,02	5,36	0,67	0,11	1,36
CEMMA	27,68	13,61	3,97	50,81	2,70	4,85	10,66	0,45	0,12	0,56
Portland I	20,16	6,88	4,02	65,33	0,76	1,59	0,80	0,51	0,16	0,51

Además, el alto contenido de Al₂O₃ está relacionado con el bajo tiempo de fraguado determinado para los diferentes tipos de cementos adicionados, debido a la potencial formación de altos contenidos de C₃A; el cual también incrementaría la susceptibilidad al ataque por sulfatos, lo cual es muy importante en construcciones en ambientes marinos.

Finalmente, es importante indicar que parece contradictorio que las normas exijan a los cementos adicionados requisitos fisico-mecánicos similares a los del cemento Portland I, cuando su composición química difiere sensiblemente como se demuestra en los resultados de este trabajo.

4. CONCLUSIONES

1. Los cementos adicionados tipo CPCA fabricados en Venezuela y evaluados en este trabajo de investigación no cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la norma venezolana para su uso en la elaboración de concreto estructural.
2. El uso de estos cementos en la elaboración de concretos de uso estructural podrá degenerar en manifestaciones patológicas prematuras.
3. Los contenidos de óxido de aluminio, óxido de calcio y trióxido de azufre de los cementos adicionados están fuera de especificación.
4. Los porcentajes de adición empleados en la fabricación de estos cementos afectan directamente sus propiedades.
5. Los resultados obtenidos en cuanto a la determinación de Al₂O₃ pudieran estar relacionados con los resultados de tiempo de fraguado.

5. REFERENCIAS

- Bolognini, H y Colaboradores (2011) “Prevención de daños y rehabilitación de estructuras de concreto armado Un Enfoque integral...” Venezuela. p 196
- Bolognini H., Martínez N., Loizaga M., Castellar D., Troconis O. (2013) “Caracterización química de cementos adicionados comercializados en Venezuela ” in: V Conpat Nacional, Alconpat Venezuela: pp 1-12
- De la Torre A, Aranda M. (2005) Análisis mineralógico por difracción de rayos X y el método de Rietveld en la industria cementera. *Cemento-hormigón* (877) 489-505.
- García M, Blanco-Varela M, De la Torre A, Bruque S, Zuñigua F. (2003) Cuantificación mineralógica directa de cementos portland por el método de Rietveld. *Cemento-hormigón* (850) 4-5.
- Le Saoût G, Kocaba V, Scrivener K (2011) Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement. *Cement and concrete research* (41) 2, 133-148.
- McLaren D, White MA (2003) Cement: Its chemistry and properties. *Journal of chemical education*. (80) 623-635
- Norma COVENIN 109-90. Cementos hidráulicos. Métodos de ensayo para análisis químico.
- Norma COVENIN 3134-04. Cemento Portland con adiciones. Requisitos.
- Norma COVENIN 487:1993 (3era Revisión). Determinación de la Finura Blaine del Cemento.
- Norma COVENIN 493:1992 (3era Revisión). Determinación del Tiempo de Fraguado (Vicat)
- Norma COVENIN 484:1993 (3era Revisión). Determinación de la Resistencia a la Compresión del Cemento.
- Joaquín Porrero (2004) Manual del concreto estructural. Caracas Venezuela
- Salamanca R, Aplicación de los cementos portland y adicionados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (010) 2000, 33-38
- Solís Carcaño Romel; Moreno I. Éric (2006): “Análisis de la porosidad de concreto con agregado calizo”, *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, Caracas, Venezuela.
- Tobón J, Kazes-Gómez R (2008) Desempeño del cemento portland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza. *Dyna* (156) 177-184.
- Troconis, O., y Otros. (1997). “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de concreto armado”. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.



Estudio de la hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín: efecto del empleo de dos aditivos superplastificantes

L. Y. Gómez-Zamorano¹, G. García-Guillén¹, J. L. Acevedo-Dávila²

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, Ave. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, CP 66450, email: lauren.gomez@muanl.edu.mx

²Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Ciencia y Tecnología No 790 Col. Saltillo 400, Saltillo, Coahuila. México, C.P. 25290.

Información del artículo

Artículo recibido el 16 de Abril de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 28 de Julio de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se enfocó en la evaluación del efecto que tienen diferentes materiales de reemplazo y dos aditivos superplastificantes en el desarrollo de las propiedades mecánicas, formación de fases y en la evolución del calor de hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas hasta un 60%. Para esto se empleó ceniza volante, escoria granulada de alto horno, metacaolín y humo de sílice. Las mezclas fueron fabricadas con una relación agua/sólidos de 0.4, 0.3% de aditivo superplastificante e hidratadas durante 60 días. En base a los resultados se confirmó que con el uso de materiales de reemplazo, se redujo la cantidad de hidróxido de calcio, debido a la reacción pozzolánica y se incrementó la resistencia a la compresión.

Palabras clave: Reactividad, materiales cementosos suplementarios.

ABSTRACT

This research was focused on assessing the impact that different replacement materials and two superplasticizers on the development of the mechanical properties, phases formation and heat evolution of portland cement pastes, with replacement levels up to 60%. For this purpose, fly ash, ground granulated blast furnace slag, metakaolin and silica fume were used. The mixtures were manufactured with a water/solid of 0.4, 0.3% of superplasticizer and cured up to 60 days. Results showed that with the use of replacement materials, the calcium hydroxide content was reduced, due to the pozzolanic reaction, and the compressive strength was increased.

Keywords: Reactivity, supplementary cementitious materials.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo a avaliação do efeito de diferentes adições e de dois aditivos superplastificantes no desenvolvimento das propriedades mecânicas, formação de fases e na evolução do calor de hidratação de pastas de cimento com substituição de até 60%. Para tanto foi empregada cinza volante, escória granulada de alto forno, metacaulim e sílica ativa. Os traços foram elaborados com uma relação água/sólidos de 0,4, com 0,3% de aditivo superplastificante e curadas durante 60 dias. Com base nos resultados obtidos, confirmou-se que com o uso de adições, a quantidade de hidróxido de cálcio foi reduzida, devido à reação pozzolânica e elevou-se a resistência à compressão.

Palavras chave: Reatividade, materiais cimentícios complementares.

Autor de correspondencia: Lauren Y. Gómez-Zamorano

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente gran parte de la investigación científica y tecnológica está enfocada hacia el desarrollo sustentable. Esto involucra el desarrollo de nuevos materiales que se caractericen por ser amigables con el medio ambiente, reduciendo el impacto ambiental que implican los procesos de obtención, transporte, producción, aplicación y reciclaje de los mismos. Uno de los sectores industriales más preocupados en reducir dicho impacto es el de la construcción, en especial la industria cementera. El proceso de producción de cemento requiere de una gran cantidad de energía térmica y eléctrica; además el proceso demanda una enorme cantidad de materia prima no renovable, tal como el uso de calizas, arcillas y combustibles fósiles, necesarios para la producción de clínker. Este proceso emite grandes cantidades de CO₂ (827 kg CO₂/t de clínker) y otros gases (como SO₂ y NO_x) que causan un gran impacto al medio ambiente y los cuales contribuyen al calentamiento global. La producción de cemento portland (CP) emite del 5 al 8% de CO₂ mundial [Cembureau (2014), Damtoft et al (2008), Schneider et al (2011)]; de manera que, el incremento en la demanda de cemento y el impacto ambiental que implica el proceso de elaboración han provocado que sea necesario optar por materiales alternativos y tecnologías que permitan su uso. Durante los últimos años se han utilizado materiales cementosos suplementarios (MCS) como las escorias de alto horno del proceso siderúrgico (EGAH), las cenizas volantes (CV) procedentes de la quema de carbón en las plantas de energía, así como puzolanas naturales o artificiales y caliza para la producción de cementos compuestos. Es posible emplear diferentes tipos de materiales que reemplacen parcialmente al cemento portland, pero el efecto que tiene cada uno por separado sobre el proceso de hidratación del cemento aún sigue en investigación y el efecto que tienen dos o más constituyentes sobre las reacciones todavía está bajo constante investigación [Juenger y Siddique (2015)]. El nivel de reemplazo, la composición química, la fracción amorfa, la actividad puzolánica o hidráulica, el tamaño de partícula y la morfología de cada material son algunos de las variables a tomar en cuenta al diseñar pastas de cemento compuesto con más de un material de reemplazo [Juenger y Siddique (2015)]. Es importante señalar que el desarrollo de las propiedades mecánicas de pastas de cemento compuesto está directamente relacionado con el efecto de los materiales de reemplazo en el proceso de hidratación de pastas de cemento. Para un cemento compuesto, el mecanismo de hidratación involucra la participación de muchas especies en la reacción en estado sólido. Adicionalmente, en cementantes binarios Bentz et al (2011) encontraron que los MCS además de alterar la distribución de las partículas del material cementoso, incrementa la densificación. Yun et al (2013), encontró que para morteros con 60% de EGAH, las propiedades mecánicas incrementaron con la fracción amorfa de la misma. Sharfuddin et al (2008), reportaron que la adición de humo de sílice (HS) redujo la permeabilidad del concreto, debido a la reducción en la porosidad y la densificación de la matriz originada por la reacción puzolánica. Sin embargo, el uso combinado de CV y HS ocasionó una mayor porosidad en la matriz cementante, probablemente causada por la rápida reacción del HS. De esta manera, el HS se debe mantener a un máximo del 10% en peso de material cementante. La adición conjunta de HS y EGAH redujo la resistencia del concreto. Además de acuerdo con Ali et al (2014), el tipo de adiciones modificó la morfología de la etringita y por tanto el calor de reacción. Ping et al (2013) analizaron el contenido de hidróxido de calcio (CH) en cementos con 40% CV y 20% EGAH, reportando una disminución del 65% comparado con el CP puro, debido a las reacciones puzolánicas e hidráulicas. Schöler et al (2015) concluyeron que los tipos de hidratos observados en los sistemas con 50% de sustitución de MCS son similares a aquellos formados en el CP puro, con una reducción en la cantidad de CH y un incremento en el C-S-H y en las fases AFm. Sin embargo, si la CV tiene una fracción amorfa relativamente pequeña, su reactividad disminuirá y por tanto la cantidad de productos formados y la resistencia a la compresión. Cabe resaltar que los

autores mencionan adiciones de hasta 30% de CV no reducen de forma significativa la resistencia a la compresión. Janotka, et al (2010) investigaron el efecto de diferentes tipos de MK en las propiedades mecánicas de pastas parcialmente reemplazadas y reportaron que al incrementar el nivel de reemplazo de MK, la RC de pastas de cemento disminuyó. Snelson et al. (2008), utilizaron MK y CV como materiales de reemplazo del CP para investigar el efecto en la evolución de calor liberado. El proceso de hidratación de las pastas de CP reemplazadas con CV cambió con el nivel de reemplazo, pues un incremento en el nivel de reemplazo de CV disminuyó el calor de hidratación. Los materiales de reemplazo como la CV, MK y HS mejoran el desempeño de pastas de CP, morteros y concreto, pero tienden a reducir la trabajabilidad de las mezclas. La razón más común es que las partículas finas de los materiales de reemplazo poseen mayor área superficial y por lo tanto se incrementa la demanda de agua para diseñar una mezcla. Diversos autores [Mansour et al (2010); Esteves et al (2010)] demostraron que al adicionar HS, CV y MK se incrementó la demanda de agua, de manera que, para mejorar la trabajabilidad, emplearon aditivos químicos superplastificantes (SP).

De esta forma, este artículo aporta investigación sobre el desarrollo de tecnologías y materiales sustentables para el sector de la construcción, con la evaluación del comportamiento de materiales suplementarios en pastas de cemento y el análisis de los resultados con la finalidad de aportar parámetros que hacen factible reemplazar parcialmente al cemento portland. Cabe señalar que este artículo contribuye de forma importante al entendimiento del efecto de diversos materiales sobre la cinética de hidratación del cemento, lo que actualmente se encuentra en investigación en diversos grupos alrededor del mundo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales de partida utilizados fueron: (a) cemento portland que se obtuvo de Cemex México, (b) escoria granulada de alto horno (proveniente de AHMSA y con 97% de fracción amorfa), (c) ceniza volante tipo F (Comisión Federal de Electricidad - México), (d) metacaolín (obtenido por la calcinación a 700°C de caolín mineral, con un tamaño de partícula menor a 75 micras), (e) humo de sílice (descondensado mediante molienda mecánica) y (f) dos aditivos superplastificantes base policarboxilato-éter. La composición química y área superficial son presentadas en la tabla 1. Los patrones de DRX de la materia prima se muestran en la figura 1. Inicialmente se homogeneizaron los materiales en polvo durante 5 minutos para que las partículas tuvieran una distribución homogénea, enseguida se agregó un cuarto de agua con aditivo, cuando se formaron los primeros aglomerados se mezclaron en segunda velocidad y poco a poco se agregó el resto del agua durante 3 minutos. Al obtenerse la trabajabilidad adecuada se dejó mezclar un minuto más y se vació la mezcla a los moldes. Después para dejar salir el aire que se generó durante la mezcla de los materiales se vibraron los moldes cúbicos de 5cm, durante un minuto y subsecuentemente se acondicionaron para que estuvieran a 25°C con 100% de humedad, durante el fraguado y curado. Después de 24h, las probetas se desmoldaron y se colocaron en una solución saturada de hidróxido de calcio (con la finalidad de evitar su lixiviación) para el proceso de curado a 1, 3, 7, 14, 28 y 60 días. Se prepararon diferentes sistemas de pastas de cemento puro y sustituido con un 10% de ceniza volante, diferentes niveles de escoria granulada de alto horno del 25% al 45%, con metacaolín empleando del 5 al 15% y humo de sílice usando 5% y 10%. Las mezclas fueron fabricadas con una relación a/s de 0.4 y 0.3% de aditivo superplastificante.

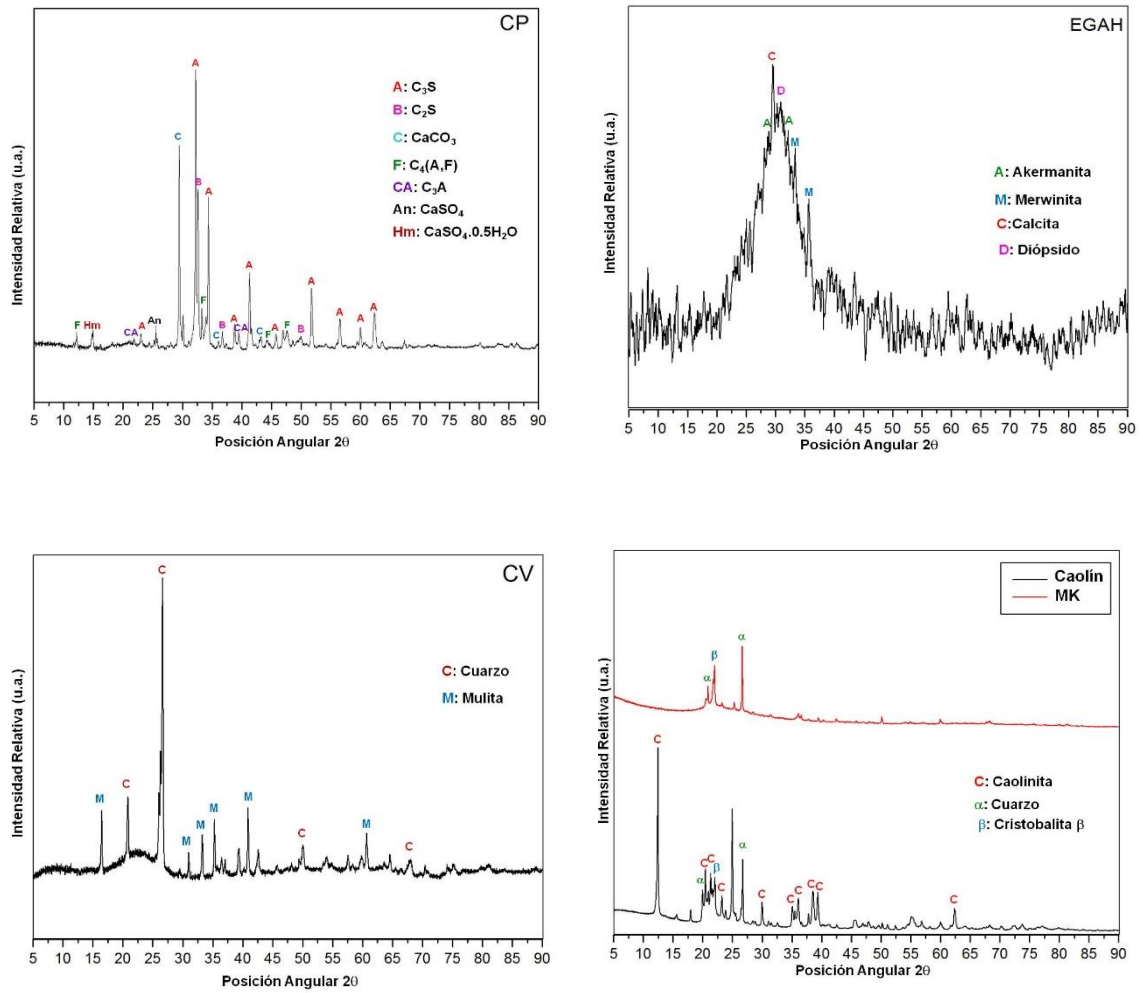


Figura 1. Patrones de difracción de rayos X de la materia prima

Tabla 1. Composición elemental en porcentaje de óxidos de los materiales de partida y área superficial (BET) de los materiales usados

	CP	EGAH	CV	MK
SiO₂	18.69	38.01	61.17	56.97
Al₂O₃	4.73	9.98	25.14	35.46
Fe₂O₃	2.17	1.85	4.56	1.02
CaO	63.46	34.32	2.42	1.45
MgO	1.78	10.04	0.85	0.03
SO₃	4.21	2.18	0.18	1.01
Na₂O	0.27	0.49	0.27	0.13
K₂O	0.67	0.58	1.41	0.54
TiO₂	0.21	1.21	0.99	1.08
P₂O₅	0.13	0.00	0.00	0.20
Mn₂O₃	0.07	1.03	0.01	0.00
LOI	3.73	0.34	3.02	2.17
Total	100.12	100.13	100.02	100.06
BET* (m²/kg)	511	491	432	573

* Área superficial

Las muestras se caracterizaron mediante resistencia a la compresión (RC); posteriormente fracciones sólidas de las muestras se sumergieron en acetona y se secaron en vacío a 50°C durante 24h, con el fin de detener las reacciones de hidratación y analizarlas mediante difracción de rayos X (DRX) y calorimetría isotérmica por conducción (CIC).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resistencia a la compresión.

La Figura 2 presenta los resultados de todos los sistemas analizados en este estudio. En la Figura 2A se observa que el uso de los aditivos SP1 y SP2 mejoró el desarrollo de la RC, para todos los tiempos de curado, resultando en una RC a 1 y 60 días de aproximadamente 49 y 76MPa para el sistema fabricado con el aditivo SP1 y de 44 y 76 MPa para la pasta con el SP2. Los aditivos superplastificantes base policarboxilato se adsorben eficazmente en la superficie de las partículas del CP provocando una alta dispersión estérica de los grupos funcionales éter, dando como resultado un aumento en la trabajabilidad y en la resistencia a la compresión. La pasta de CP fabricada con el aditivo SP1 presentó resistencias ligeramente más elevadas que la elaborada con el SP2. Este resultado es posiblemente debido a la presencia del grupo funcional éter que aparece en el espectro FTIR del aditivo SP1. Winnefeld et al (2007), reportaron resistencias a la compresión a 7 días de curado de entre 38.1 a 54.6MPa, indicando que a edades tempranas la RC aumenta con el incremento de la longitud y la densidad de la cadena lateral de los grupos funcionales éter del superplastificante. La Figura 2B muestra los resultados de la RC desarrollada por los sistemas binarios, donde se observa que las pastas 10CV con SP1 y SP2 desarrollaron una resistencia a la compresión a 60 días por encima de los sistemas binarios 45EGAH y 15MK. Golapan (1993); Isaia et al (2003); Slanicka S (1999) han reportado que el incremento de la RC de pastas de cemento parcialmente reemplazadas con CV se debe al tamaño y morfología de las partículas de ceniza volante. Partículas pequeñas y esféricas llenan los huecos y producen una matriz densa, aumentando además la actividad puzolánica del material, lo cual ocasiona un incremento de la RC. Cabe señalar que esta actividad puzolánica no es inmediata, sino que puede tomar de 3 a 7 días, por lo que la mejoría en la RC se ve afectada a tiempos de curado intermedios. Este efecto también se presenta en pastas de cemento con 10 y 15% de CV [Gutteridge et al (1990)]. Las pastas 15MK con ambos aditivos mostraron RC superiores al CP y los demás sistemas binarios a un día de curado. Este comportamiento se atribuyó al tamaño fino del MK. Se ha publicado [Mansour et al (2010); Caldarone et al (1994); Wild et al (1996)] que el uso de MK contribuye al desarrollo de resistencias mecánicas a edades tempranas debido a su tamaño de partícula fino que densifica la microestructura de las pastas, y a su fuerte actividad puzolánica. Khatib et al (1996) analizaron el desarrollo de resistencia de pastas de cemento reemplazadas con 10% de MK a diferentes tiempos de curado y obtuvieron las máximas RC a 14 días, lo que indicó que la actividad puzolánica del MK alcanza su punto máximo de reacción en este período. También se ha reportado [Mansour et al (2010)] que para dispersar al MK en una pasta de cemento se necesita el uso de superplastificantes, lo cual mejora la trabajabilidad, reología y propiedades mecánicas de las pastas. La pasta de CP reemplazada con MK usando el SP2 mostró RC superiores, aproximadamente en un 10%, en comparación con la pasta 15MK con SP1. Los factores que pudieron haber afectado este comportamiento fueron, la relación a/s, la calidad de SP y el efecto de dispersión provocado por el aditivo..

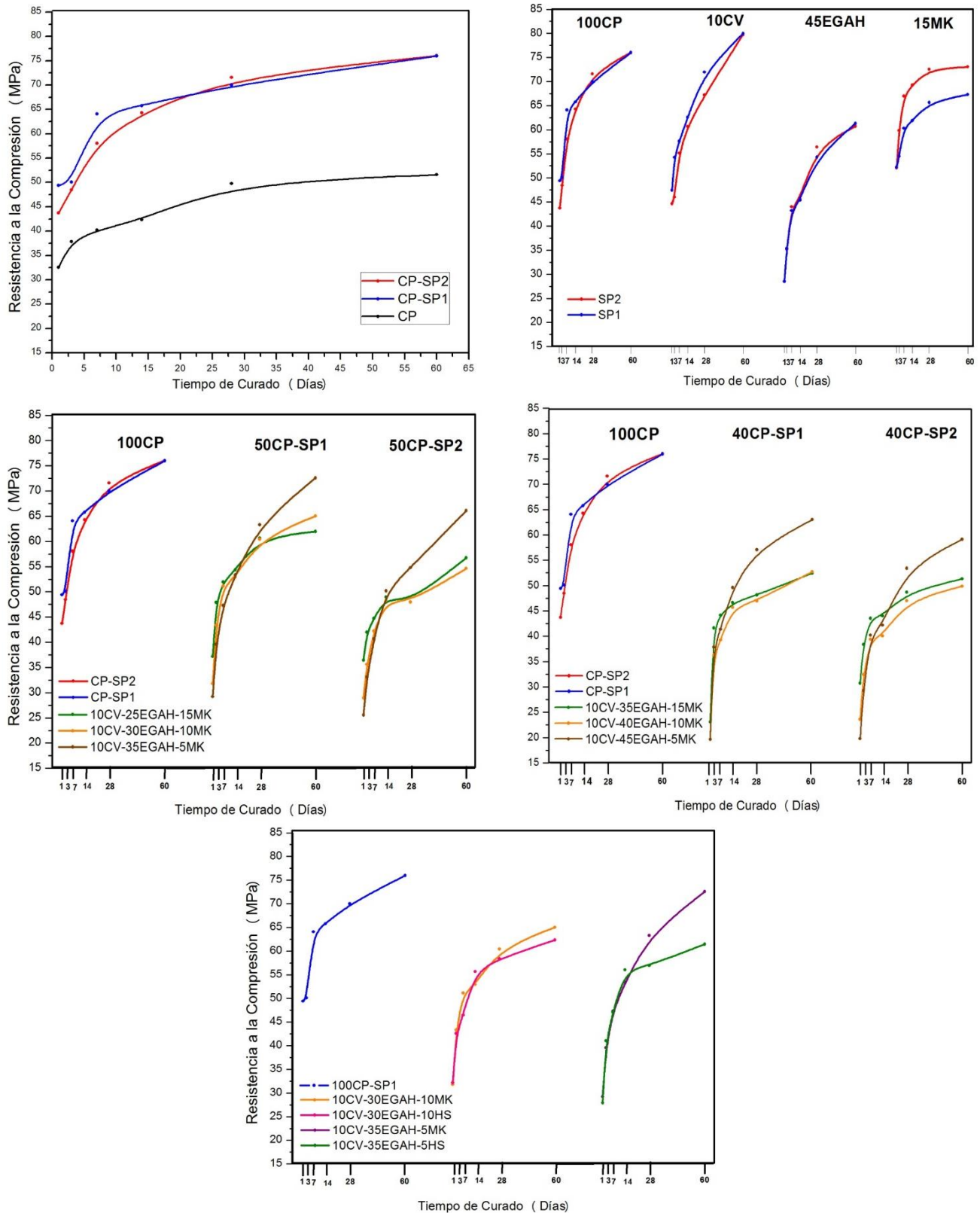


Figura 2. Resistencia a la compresión de los sistemas con los aditivos SP1 y SP2: A) Pastas de CP, B) Sistemas binarios, C) pastas de CP reemplazadas al 50% con CV, EGAH y MK, D) pastas de CP reemplazadas 60% con EGAH, CV y MK, E) pastas de CP reemplazadas en un 50% con CV, EGAH, MK y su comparativa con HS usando el aditivo SP1.

El desarrollo de la RC de los sistemas binarios 45EGAH, a uno y 60 días de curado, estuvo por debajo de la RC de las pastas de 100CP y de los sistemas 10CV y 15MK, este comportamiento se atribuyó a que bajo las condiciones planteadas de relación a/s, nivel de reemplazo de EG AH y dosificación del SP, la fluidez de la pasta de los sistemas binarios 45EGAH se incremento provocando un exceso de agua en la mezcla y por ende un cambio en el proceso de hidratación y en las propiedades mecánicas del sistema.

Los resultados de los ensayos de RC en los cementos cuaternarios con ambos superplastificantes se presentan en Figuras 2 C y D. Es posible apreciar que el sistema 10CV-25EGAH-15MK fue el que desarrolló mejor RC a un día de curado (aproximadamente 37 y 36MPa, para ambos SP). Sin embargo estas resistencias se encontraron por debajo de la RC de las pastas de CP a la misma edad de curado. La pasta 10CV-35EGAH-5MK para los dos aditivos superplastificantes desarrolló la mejor RC a 60 días curado, siendo mayor para SP1 (73 MPa). Este comportamiento se relacionó con el presentado por los sistemas binarios con 10CV y 15MK, ya que fue evidente el efecto de la actividad puzolánica del MK en el desarrollo temprano de RC, en cambio la actividad puzolánica de la CV y la mayor proporción de EG AH benefició el desarrollo de RC a 60 días de curado. Además, se puede observar que las pastas con SP1 desarrollaron RC por encima de las fabricadas con SP2. Los factores que pudieron influir en este comportamiento fueron la relación a/s, la dosificación del superplastificante y la dispersión causada por los aditivos. Por otro lado, el desarrollo de RC de las pastas de CP reemplazadas en un 60% por CV, EG AH y MK muestra una tendencia similar a la de los resultados de RC de las pastas de CP con 50% de reemplazo; sin embargo, el desarrollo de RC a edades tempranas fue menor. Además, la pasta 10CV-35EGAH-15MK con ambos aditivos desarrolló la mejor RC a un día de curado en comparación con la pasta 10CV-45EGAH-5MK que mostró la mejor RC a 60 días de curado. Debido a que la pasta 10CV-35EGAH-5MK fabricada con el SP1 presentó los altos valores de RC a 60 días de curado, se comparó el efecto de reemplazar el 5% de MK por 5% de HS. Además se consideró estudiar el mismo efecto en la pasta 10CV-30EGAH-10MK.

La tendencia de los resultados de la Figura 2E indica que las pastas 10CV-30EGAH-10MK y 10CV-35EGAH-5MK mostraron una mayor RC que las pastas con 10CV-30EGAH-10HS y 10CV-35EGAH-5HS a 60 días de curado, siendo mayor la resistencia en las pastas donde se utilizó MK (~73MPa). Roy (2001) indicó que el HS sólo incrementa la resistencia a edades tempranas, mientras que la RC a edades tardías disminuye con el incremento de reemplazo de CV. Sin embargo, en la presente investigación, el reemplazo de CV se mantuvo fijo. Además, las mejores resistencias fueron en las pastas con mayor reemplazo de EG AH y tiempo de curado de 60 días, lo que concuerda con el estudio hecho por Gesoglu et al (2003), quienes concluyeron que el adicionar un 30% de EG AH y 10% de HS mejora la RC a 28 días de curado.

3.2. Difracción de Rayos X.

Se analizaron muestras representativas de las pastas de cemento reemplazadas en un 50% y 60%, fabricadas con los dos SP y curadas durante 28 días, observando las siguientes fases:

- ✦ - Portlandita (CH). C - Calcita (CaCO_3), α - Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), ★ Alita (C_3S), ▲ Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$), S - Estratlingita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\cdot 8\text{H}_2\text{O}$), β - Belita ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-C}_2\text{S}$),
- - Hidrotalcita ($(\text{Mg}_{0.667}\text{Al}_{0.33})(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_{0.167}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}$).

En la Figura 3A se muestran los resultados del análisis de DRX de la pasta de CP fabricada con el SP1 (CP-SP1) y en la 3B con el SP2 (CP-SP2) a 28 días de hidratación, donde fue posible observar que para ambas se presentaron las reflexiones características de la portlandita (CH) en la posición angular 2θ de 18.08° y 34.3° . Además en el sistema CP-SP1 se identificó etringita, con reflexiones características en las posiciones angulares 2θ de 9.147° , 23° y 51.784° . La etringita está

directamente relacionada a la cantidad de C₃A y la disponibilidad de iones SO₄²⁻ en la fase líquida (Meredith et al, 2004). Un estudio hecho sobre el efecto de los aditivos superplastificantes base policarboxilato en el proceso de hidratación del C₃A demostró que las moléculas del aditivo superplastificante se adsorben preferentemente en la superficie de la fase C₃A [Plank et al (2006)]. Sin embargo durante la hidratación inicial del C₃A, las moléculas del aditivo superplastificante pueden formar complejos órgano-metálicos al intercalarse entre las capas de las fases hidratadas del C₃A. La intercalación de las moléculas del policarboxilato es un proceso no deseado, pues disminuye el efecto de dispersión de las partículas de cemento. Plank et al (2010) realizaron un estudio sobre el mecanismo de la intercalación de los policarboxilatos entre las capas de las fases hidratadas del C₃A y la función de los iones sulfatos presentes en el cemento y reportaron que a una concentración alta de iones sulfato en la solución acuosa se favorece el mecanismo de intercalación los iones sulfato entre las capas de las fases hidratadas del C₃A dando lugar a la formación de fases AF_t y AF_m.

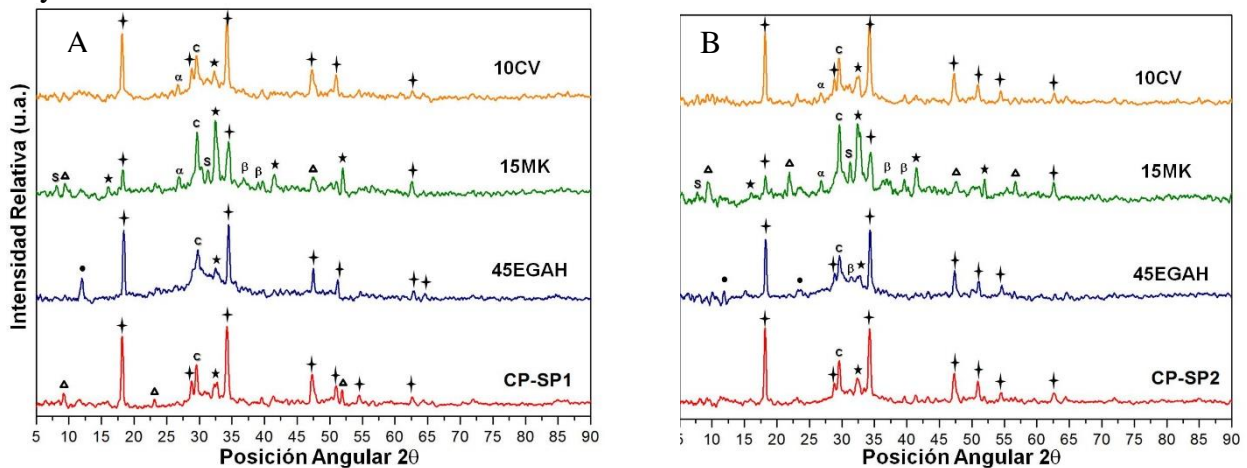


Figura 3. Patrón de difracción de los sistemas binarios a 28 días de curado, fabricadas con (A) aditivo SP1 y (B) aditivo SP2.

En la Figura 3 también se muestran los patrones de DRX de los sistemas binarios 10CV, 15MK y 45EGAH fabricados con los aditivos SP1 y SP2. En esta figura es posible observar que la pasta 15MK mostró una mayor actividad puzolánica, debido a que la intensidad de reflexión del CH en 34.3° de la posición angular 2θ disminuyó en mayor proporción con respecto a las demás pastas, esto se asoció a un mayor consumo de CH. También fue posible identificar la etringita-C₂Al₂SiO₇.8H₂O (posición angular 2θ en 7.045° y 31.08°), fase de la familia de fases AF_m y característica de los productos de hidratación de pastas de cemento reemplazadas con MK (Janotka et al, 2010) y de la hidratación de la EGAH (Martinez Alvarado, 2009). También se identificó la fase etringita, cuya intensidad fue ligeramente mayor en la pasta de 15MK del aditivo SP2. La formación de etringita es evidente a causa de la reacción preferencial de los aluminatos del MK con los iones SO₄²⁻ del CP [Talero, (2005)]. En los mismos patrones también se observó la presencia de C₃S y β-C₂S indicando la reacción incompleta de las fases del cemento portland, al menos hasta los primeros 28 días de curado. Otra de las fases identificadas fueron la hidrotalcita (posición angular 2θ de 11.81°), que se presentó en las pastas 45EGAH con ambos aditivos. La intensidad de reflexión del pico característico de esta fase fue ligeramente mayor en la pasta 45EGAH con aditivo SP1. La formación de esta fase se atribuye a la hidratación de la EGAH mediante la activación causada por la presencia del CH. Haha et al (2011), reportó que para una escoria activada alcalinamente se

observa hidrotalcita intermezclada con el C-S-H y el MgO que contenía la escoria, como uno de los productos de reacción.

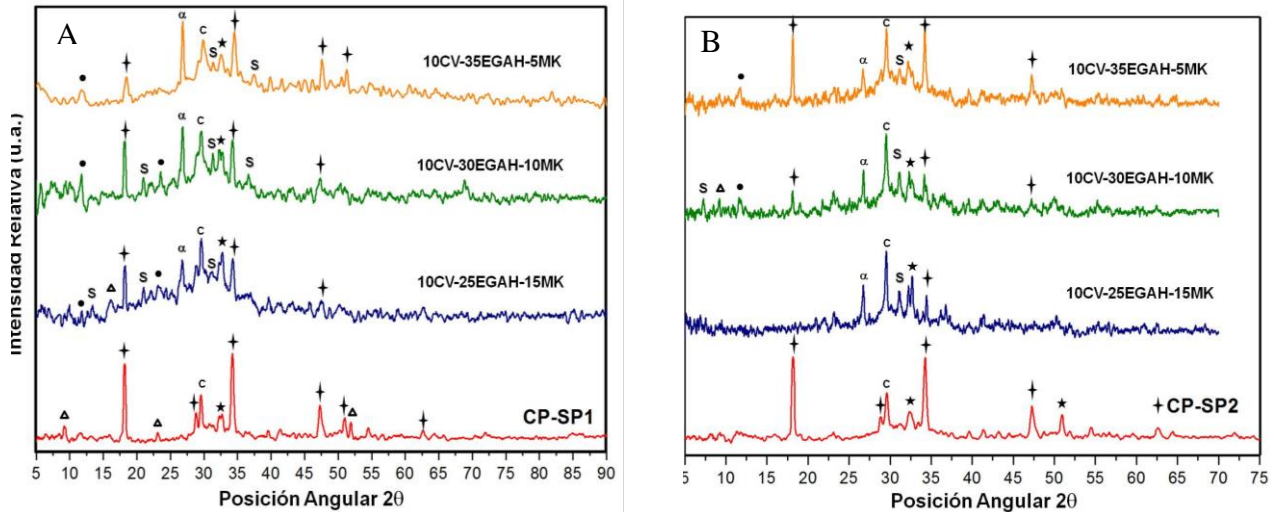


Figura 4. Patrón de difracción para las pastas de CP reemplazadas en un 50% con CV, EGAH y MK, usando el aditivo a) SP1 y b) SP2 a 28 días de curado.

La Figura 4A presenta los patrones de difracción de las pastas de CP y las pastas de CP reemplazadas al 50% con CV, MK y EGAH y fabricadas con el SP1 28 días de curado. En base a los resultados, es posible considerar un alto consumo de hidróxido de calcio causado por la reacción puzolánica de la CV y MK y por la hidratación de la EGAH. Se identificaron también fases cristalinas características de los productos de hidratación del MK y la EGAH, como la estratlingita e hidrotalcita, respectivamente. Además, el análisis de las pastas de CP reemplazadas con CV, MK y EGAH indicó que la pasta 10CV-35EGAH-5MK presentó las reflexiones características de estratlingita (posición angular 2θ de 11.65° y 34.88°) e hidrotalcita, y en la pasta 10CV-30EGAH-10MK sólo se presentó estratlingita. En base a estos resultados es posible considerar que con un nivel de reemplazo de 15% de MK en pastas de cemento portland reemplazadas con CV, EGAH y MK se favorece la formación de la estratlingita debido a la actividad puzolánica del MK a edades tempranas. También se sugiere que la formación de la hidrotalcita se debe a la activación de la EGAH con el CH y se favorece a 28 días de curado en el sistema con mayor reemplazo de EGAH.

En la Figura 4B se presentan los patrones de difracción de las pastas de CP y las pastas de CP con 50% de reemplazo de CV, MK y EGAH fabricadas con el SP2 a 28 días de curado; de acuerdo al análisis de esta información, el SP2 tuvo un efecto ligeramente diferente en el proceso de hidratación de las pastas de cemento en comparación con el SP1, donde en los patrones de difracción de las pastas de CP se identificaron reflexiones características de la etringita de intensidad débil, la cual no se presentó en la pasta de CP fabricada con el SP2. En las pastas 10CV-25EGAH-15MK, 10CV-30EGAH-10MK y 10CV-35EGAH-5MK se identificaron las reflexiones características de la estratlingita, pero no de etringita e hidrotalcita. Estos resultados sugieren que el SP2 se adsorbió preferencialmente en la fase C_3A y la reacción de los iones sulfato, calcio y aluminio en la solución acuosa promueven la formación de etringita durante la hidratación inicial. Además la interacción de las moléculas policarboxilato del SP2 con la fracción amorfa silicoaluminosa favorece la formación de estratlingita durante la hidratación inicial de las pastas de cemento. En las pastas 10CV-30EGAH-10MK y 10CV-35EGAH-15MK se observó la presencia de

hidrotalcita. De acuerdo a estos resultados, el aditivo SP2 favorece la formación de la fase estratlingita y un mayor consumo de CH en las pastas de mayor contenido de MK a 28 días de curado.

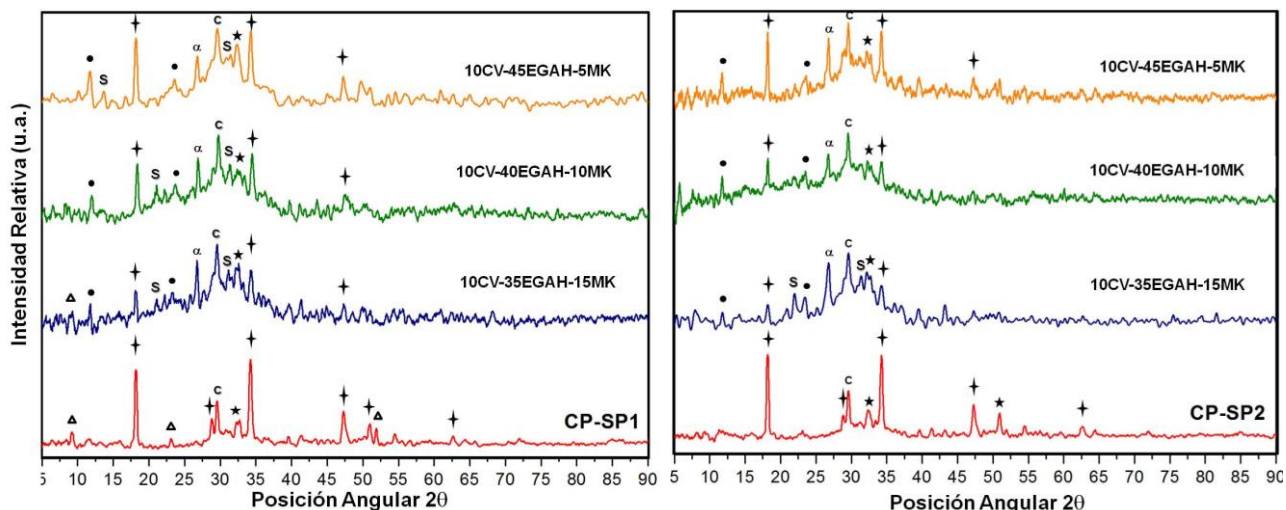


Figura 5. Patrón de difracción para las pastas de CP reemplazadas en un 60% con CV, EGAH y MK, usando el aditivo a) SP1 y b) SP2 a 28 días de curado

En la Figura 5 se presentan los patrones de difracción de las pastas de CP reemplazadas en un 60% con CV, EGAH y MK, a 28 días de curado. En general, la tendencia de los resultados de difracción de Rayos X para el sistema con 60% de CV, EGAH y MK fabricado con SP1 puede describirse como sigue: La intensidad de reflexión del pico característico de la fase CH en la posición angular 2θ de 34.3° disminuyó en mayor proporción en las pastas 10CV-35EGAH-15MK y 10CV-40EGAH-10MK a uno y 28 días de curado, las cuales contenían un mayor porcentaje de reemplazo de MK, demostrando la fuerte actividad puzolánica del MK. Se identificaron estratlingita, etringita e hidrotalcita a uno y 28 días de curado. La estratlingita presentó una intensidad más débil en la pasta 10CV-45EGAH-5MK. Al emplear el aditivo SP1 y comparar los resultados de 50 y 60% de reemplazo se pudo observar en este último la presencia de la fase hidrotalcita. Realizando la misma comparación, pero para las pastas con el SP2, se puede observar que no se identificó etringita a 28 días de curado y que no se presentaron las reflexiones de la estratlingita en las pastas 10CV-40EGAH-10MK y 10CV-45EGAH-5MK a 28 días de curado.

3.3. Calorimetría Isotérmica por Conducción

Inicialmente se probaron los aditivos superplastificantes en las pastas de CP, después en base al porcentaje de reemplazo y a los resultados de RC se seleccionaron los sistemas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK fabricados con ambos aditivos. De acuerdo a los resultados de RC, las pastas con el aditivo SP1 desarrollaron las mejores RC, por tal motivo se seleccionó otra pasta para este aditivo, la pasta 10CV-30EGAH-10MK. Finalmente se realizó una comparativa entre el efecto de adicionar HS en lugar de MK en las pastas fabricadas con el aditivo SP1. La Figura 6 muestra los resultados del análisis por calorimetría isotérmica de las pastas de CP con y sin aditivos a 25°C .

Se observa que el pico principal de la curva de evolución del calor de hidratación de la pasta de CP sin aditivo, debido a la hidratación del C_3S , correspondió a 9 horas de tiempo de hidratación. Al comparar esta curva con aquellas obtenidas para el CP con ambos aditivos, es posible observar un desplazamiento de las mismas en el pico principal de hidratación, el cual correspondió a 11 horas,

evidenciando un retraso en el proceso de hidratación. Se ha reportado que los aditivos superplastificantes retardan la hidratación de los silicatos (especialmente del C_3S). Lothenbach et al (2007) encontraron que los superplastificantes base policarboxilatos retrasan la disolución del C_3S , y por tanto la formación de portlandita y C-S-H. Además se observó una diferencia en el inicio del período de aceleración entre las pastas de CP sin aditivo y las con que contenían SP1 y SP2. El tiempo de hidratación inicial del período de aceleración para las pastas de CP fue de 2.5 horas, mientras que para las pastas con SP1 fue de 4 horas y para las aquellas con SP2 fue de 3 horas. Esta diferencia se atribuyó a que el período de inducción en presencia de ambos aditivos fue más largo, dando más tiempo a la reacción de hidratación del C_3S para formar C-S-H. También se observa que la evolución de calor de hidratación (J/Kg-h) y la liberación de calor total (Q/Kg) de la pasta de CP con SP2 fue mayor que la pasta de CP sin aditivo y la de SP1. El período de aceleración debido a la nucleación y crecimiento del gel C-S-H y CH para las pastas con SP2 fue más exotérmico.

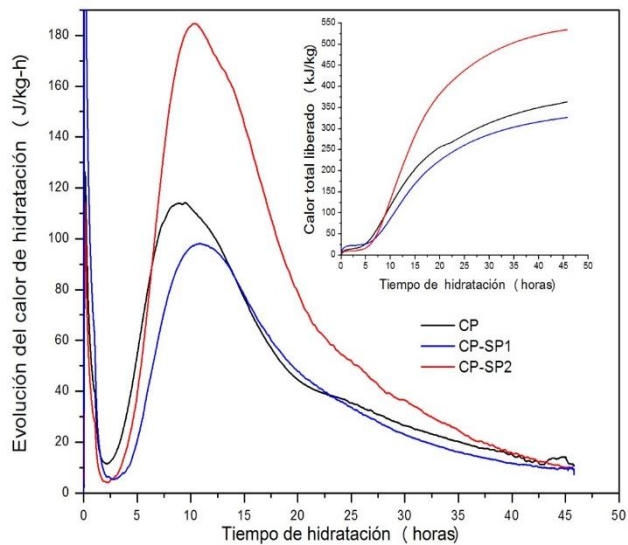


Figura 6. Curvas de evolución de calor de hidratación y del calor total liberado de las pastas de CP sin aditivo y con los aditivos SP1 y SP2.

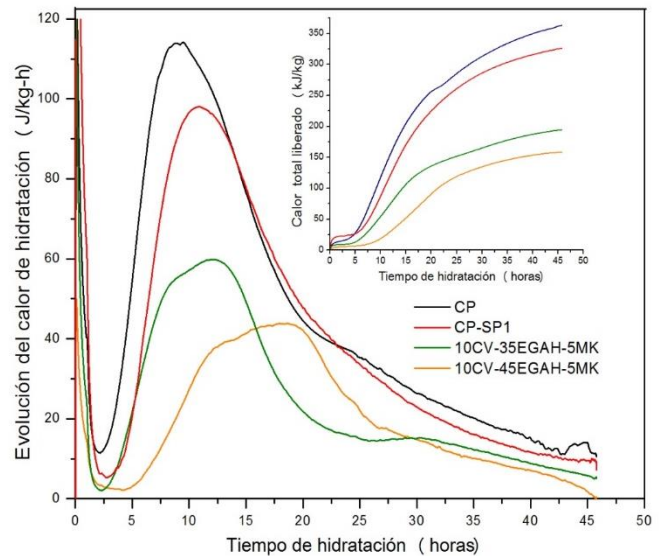


Figura 7. Curvas de evolución de calor de hidratación y del calor total liberado de la pasta de CP sin aditivo, con SP1 y las pastas reemplazadas con CV, EGAH y MK fabricadas con el aditivo SP1.

A partir de estos resultados es posible sugerir que los aditivos superplastificantes cambian el mecanismo de hidratación de las pastas de CP, pero además cada aditivo mostró un comportamiento diferente en el cemento puro. De esta manera, el aditivo SP1 influyó en prolongar el período de inducción, lo cual puede estar relacionado con el efecto de dispersión provocado por la repulsión estérica de los grupos funcionales éter de los aditivos superplastificantes base policarboxilato-éter, asociado a la presencia del grupo funcional éter vinílico que presentó el SP1. El aditivo SP2 ocasionó que el período de inducción fuera menor que el de la pasta de CP con el aditivo SP1, lo cual se puede atribuir a la menor adsorción de las moléculas de policarboxilato en la superficie de las partículas de cemento. El aditivo SP2 presentó *dos bandas de absorción adicionales características de las sales de carboxilato*. Se ha reportado que aditivos superplastificantes base policarboxilato de cadena lateral larga y alta densidad disminuyen el retraso del período de inducción debido a que las moléculas de polímero se adsorben en menor proporción en la partícula de cemento. Es posible que la rápida evolución de calor de hidratación durante el período de

aceleración del proceso de hidratación de la pasta de CP con el aditivo SP2 se relacione con la baja adsorción de las moléculas de polímero en la superficie de las partículas de cemento, debido a una mayor difusión de iones Ca^+ y agua de la fase líquida hacia la fase sólida, lo cual pudo haber generado más sitios de nucleación y crecimiento del gel C-S-H. Mollah et al (2000) propusieron tres mecanismos diferentes para explicar el efecto retardante de los superplastificantes base policarboxilato en la hidratación del cemento, de los cuales es posible asociar el efecto de SP1 y SP2 con dos de ellos: (a) las moléculas del superplastificante son adsorbidas en la superficie de la partícula del cemento y obstaculizan la difusión de agua e iones de calcio en la interfase cemento-solución, sin embargo la adsorción en C_3S es menor que en el C_3A ; (b) la acción dispersante del superplastificante cambia la cinética de crecimiento y la morfología de las fases hidratadas. De acuerdo a los resultados de DRX, uno de los productos de hidratación formados en la pasta CP con el aditivo SP1 a 28 días de curado fue la etringita, esta fase se pudo haber formado durante el período de inducción, debido a que la adsorción de las moléculas de policarboxilato-éter del aditivo SP1 redujo la difusión de iones Ca^+ y agua de la fase líquida hacia la fase de silicato de calcio hidratada y es posible que se haya favorecido la reacción de la fase de aluminato de calcio hidratada y los iones SO_4^{2-} de la solución acuosa.

En la Figura 7 se comparan las curvas de evolución de calor de hidratación de las pastas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK fabricadas con el SP1. La evolución de calor de hidratación de las pastas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK fue menor que las pastas de CP sin aditivo y con SP1. Se ha reportado [Langan et al (2002); Snelson et al (2008)] que la evolución del calor de hidratación de pastas de cemento compuesto con EGAH, CV y MK es menor que la de la pasta de CP y lo relacionan al mayor requerimiento de agua de los materiales puzolánicos y a la menor disponibilidad de iones Ca^+ para el crecimiento de CH y C-S-H.

Otra diferencia de las pastas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK con respecto a las pasta de CP es la formación de un pico adicional en la curva de evolución de calor de hidratación durante el período de aceleración. Talero y Rahhal (2009) reportaron un tercer pico en las curvas de evolución de calor de hidratación de pastas de CP reemplazadas con 20% de MK, el cual asociaron actividad puzolánica del Al_2O_3^- del MK. Escalante (1996) también reportó la aparición de un tercer pico en la curva de evolución de calor de hidratación debido a la contribución de la EGAH al proceso de hidratación a temperaturas de 10 a 60°C. También es posible relacionar este aumento en la evolución del calor de hidratación con la formación de productos de hidratación como la estratlingita e hidrotalcita, favorecidas por la activación de la EGAH favoreció la formación de hidrotalcita y la actividad puzolánica del MK la formación de estratlingita y en base a los resultados de la RC, que fue más alta para la pasta 10CV-35EGAH-5MK fabricada con SP1.

El retraso en el proceso de hidratación de las pastas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK con respecto a las pastas de CP sin aditivo y con aditivo SP1, puede deberse a una disolución lenta del C_3S para producir C-S-H y CH. Sin embargo este efecto fue más significativo para la pasta 10CV-45EGAH-5MK, pues su pico principal se observó a las 12.5 horas, en comparación con la pasta 10CV-35EGAH-5MK que fue a las 8 horas. Esta diferencia fue probablemente debida al mayor contenido de EGAH y al efecto retardante de la CV. De acuerdo a Hwang y Shen (1991) el incremento en la cantidad de EGAH reduce el calor de hidratación producido por el C_3S y C_3A . Langan et al (2002) encontraron que durante los primeros minutos de hidratación de pastas de CP con 10 y 20% CV se disminuye la concentración de iones en solución en las primeras horas, por lo que se retrasa la nucleación y crecimiento del C-S-H y CH.

Los resultados del análisis de calorimetría isotérmica a 25°C para las pastas 10CV-35EGAH-5MK y 10CV-45EGAH-5MK con el aditivo SP2 se presentan en la Figura 8. La evolución de calor de hidratación de éstas pastas fue menor (60 y 50J/Kg-h, respectivamente) que las de las pastas de CP con aditivo SP1 (190J/Kg-h) y sin éste (115J/Kg-h), por lo discutido anteriormente. Estas curvas

también presentaron un tercer pico debido a la actividad puzolánica del MK y la hidratación de la EGAH. Además el retraso del proceso de hidratación durante el período de inducción fue menor para estos sistemas, lo cual puede estar relacionado con la menor adsorción de las moléculas del SP2 en la superficie de las partículas de cemento.

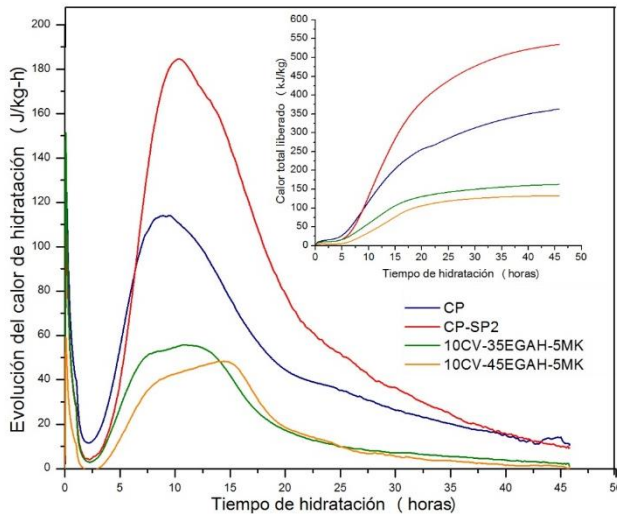


Figura 8. Curvas de evolución de calor de hidratación y del calor total liberado por la pasta de CP sin aditivo, con SP2 y las pastas reemplazadas con CV, EGAH y MK fabricadas con el aditivo SP2.

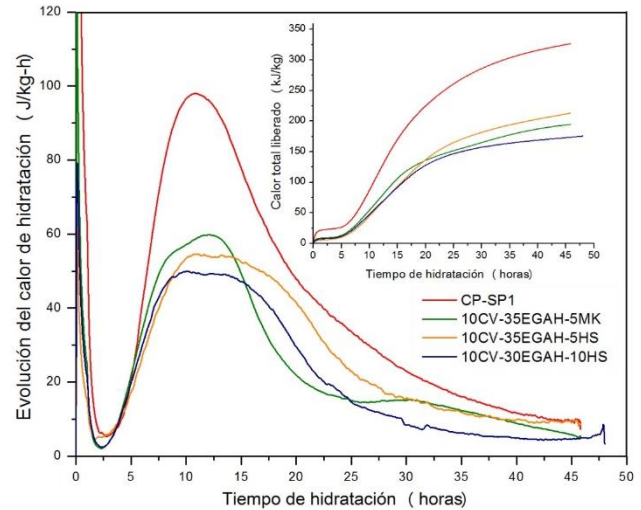


Figura 9. Curvas de evolución de calor de hidratación y del calor total liberado de la pasta de CP con SP1 y las pastas reemplazadas con CV, EGAH, MK y HS fabricadas con el aditivo SP1.

Los resultados del análisis de calorimetría isotérmica para la pasta de CP con el SP1 se presentan en la Figura 9, haciendo una comparación con el comportamiento de un sistema adicional fabricado con 5 y 10% de HS. Se puede observar que las reacción de hidratación de las pastas 10CV-35EGH-5HS y 10CV-30EGAH-10HS desarrollaron menor calor de hidratación que la pasta 10CV-35EGAH-5MKS. Esto se relaciona con los resultados de RC, en la presencia de MK generó los mejores valores a edades tempranas. La disminución en el calor de hidratación puede ser debida a: (1) la precipitación de los productos de reacción en las pastas de CP con MK fue menos exotérmica que en las de las pastas de CP y (2) debido a la menor cantidad de cemento utilizado es posible que exista una menor cantidad de productos de hidratación formados en etapas iniciales [Janotka et al (2010)]. El calor total liberado por la pasta 10CV-30EGAH-5HS fue mayor que el de la pasta 10CV-35EGAH-5MK y se puede asociar a que durante la hidratación de la pasta 10CV-30EGAH-5HS se prolongó el período de desaceleración favoreciendo el proceso de hidratación del CP y a que tanto la reacción puzolánica de la CV y HS como la activación de la EGAH fueron más exotérmicas.

4. CONCLUSIONES

- La adición de 10% de CV mejoró el desarrollo de RC en el sistema binario. El nivel de reemplazo óptimo de la EGAH en pastas que además contenían CV y MK fue de 35% y 45%. Este porcentaje de reemplazo favoreció el desarrollo de RC a edades de 60 días de curado, siendo mayor en el sistema con 10CV-35EGAH-5MK. El aditivo SP1 favoreció el desarrollo de RC del sistema de pasta de cemento compuesto 10CV-35EGAH-5MK. El aditivo SP2 favoreció el desarrollo de RC del sistema binario de pasta de CP reemplazada con 15% de MK.

- La actividad puzolánica del MK se favoreció en las pastas de cemento con mayor nivel de reemplazo de MK a un día de curado, lo que favoreció el desarrollo de RC.
- El proceso de hidratación de la EGAH condujo a la formación de hidrotalcita, favoreciéndose en las pastas con mayor reemplazo de EGAH. La hidratación del MK y la reacción puzolánica con el CH de la hidratación del CP, favorecieron la formación de estratlingita en las pastas de CP con 15% de MK y en las pastas de CP reemplazadas con CV, EGAH y MK.
- En la curva de calor de hidratación de las pastas de CP, los aditivos superplastificantes retrasaron la nucleación y crecimiento del gel C-S-H. En la curva de calor de hidratación de las pastas de CP, el aditivo SP2 aumentó la liberación de calor del pico principal, siendo un proceso más exotérmico. El aditivo SP1 mejoró el proceso de hidratación de los sistemas con CV, EGAH y MK, con reemplazos altos de EGAH y bajos de MK, mostrando mayor calor de hidratación en el pico principal de la curva de evolución de calor de hidratación. El calor liberado por la hidratación de la EGAH en el sistema 10CV- 35EGAH-5MK modificó la curva de evolución de calor de hidratación del CP, presentó un pico adicional, que se prolongaba a mayor nivel de reemplazo de EGAH. Esto implicó un proceso de hidratación más exotérmico para la pasta con el SP1. El calor de hidratación por la actividad puzolánica del MK fue superior al presentado por el HS, ya que el pico principal de la curva de hidratación del sistema 10CV-35EGAH-5MK estuvo por encima del sistema 10CV-35EGAH- 5HS.
- En general, el uso de altas cantidades de materiales puzolánicos e hidráulicos en la formación de los sistemas presentados aquí produce un aumento en las propiedades mecánicas de los sistemas, así como en las reacciones de hidratación mejorando la resistencia a la compresión.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece ampliamente el soporte financiero de CONACYT – México para la realización de este proyecto.

6. REFERENCIAS

- Ali M., Gözde I.N.S., Kambiz R., 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point., *Construction and Building Materials*, 70: 17–25.
- Bentz D.P., Hansen A.S., Guynn J. M. (2011) “Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes”, *Cement and Concrete Composites*, 33, pp. 824–831.
- Caldarone M. A., Gruber K. A., Burg R.G. (1994) “High-reactivity metakaolin: a new generation minerals admixture”; *Concrete International: design and construction*, pp. 37-40.
- CEMBUREAU (2014), *The European Cement Association Activity Report*.
- Escalante García J. I. (1996); PhD thesis: *The effect of temperature on the hydration of Portland cement and composite cement pastes*; University of Sheffield.
- Damtoft JS, Lukasik J, Herfort D, Sorrentino D, Gartner EM (2008) “Sustainable development and climate change initiatives”; *Cement and Concrete Research*, 38; pp. 115–127.
- Esteves L. P., Cachim P. B., Ferreira V. M. (2010) “Effect of fine aggregate on the rheology properties of high performance cement-silica systems”; *Construction and Building Materials*, 24, pp. 640-649.
- Gesoglu M., Guneyisi E., Özbay E. (2009) “Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume; *Construction and Building Materials*, 23, pp. 1847-1854.
- Golapan M. K. (1993) “Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ahs concrete”; *ACI Materials Journal*, pp. 117-121.

- Gutteridge W. A., Dalziel J. A. (1990) “The effect of a secondary component on the hydration of Portland cement, Part II: Fine hydraulic binders”; *Cement and Concrete Research*, 20, pp. 853-861.
- Haha M. B., Saout G. Le, Winnefeld F., Lothenbach B. (2011) “Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast furnace slags”; *Cement and Concrete Research*, 41, pp. 301-310.
- Hwang C. L., Shen D. H. (1991) “The effects of Blastfurnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement”; *Cement and Concrete Research*, 21, pp. 410-425.
- Isaia G. C., Gastaldini A.L.G., Morales R., (2003) “Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high performance concrete”; *Cement and Concrete Composites Vol. 25*, pp. 69-76.
- Janotka I., Puertas F., Palacios M., Kuliffayová M., Varga C. (2010) “Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties”; *Construction and Building Materials*, 24, pp. 791-802.
- Juenger M.C.G., Siddique R. (2015) “Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete”, *Cement and Concrete Research* 78, pp. 71–80
- Khatib J. M., Sabir B. B., Wild S. (1996) “Pore size distribution of metakaolin paste”; *Cement and Concrete Research*, 26, pp. 1545-1553.
- Langan B. W., Weng K., Ward M. A. (2002) “Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement”; *Cement and Concrete research*, 32, pp. 1045-1051.
- Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R. (2007) “The influence of superplasticizers on the hydration of Portland cement”; Empa, Dübendorf, Switzerland.
- Mansour S. M., Abadlia M. T., Bekkour K. (2010) “Improvement of Rheological Behaviour of Cement Pastes by Incorporating Metakaolin”; *European Journal of Scientific Research*, 42, pp. 428-438.
- Martínez-Alvarado M. J; (2009); Tesis: Estudio de la hidratación de la escoria granulada de alto horno (EGAH) a diferentes temperaturas; Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica; Escuela Superior de Ingenierías e Industrias Extractivas; Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Meredith P., Donald A.M. Meller N., Hall C. (2004) “Tricalcium aluminate hydration: microstructural observations by in-situ electron microscopy”; *Journal of Materials Science* 39, pp. 997-1005.
- Mollah M. Y. A., Adams W. J., Schennach R., Cocke D. L. (2000) “A review of cement – superplasticizers interactions and their models”; *Advances in Cement Research* 12, pp. 153-161.
- Ping D., Zhonghe S., Wei C., Chunhua S., 2013. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete., *Construction and Building Materials*, 44: 1–6.
- Plank J., Dai Z., Andres P.R. (2006), “Preparation and characterization of new Ca-Al-polycarboxylate layered double hydroxides”; *Materials Letters* 60; pp. 3614-3617.
- Plank J., Zhimin D., Keller H., Hössle F. V., Seidl W. (2010) “Fundamental mechanisms for polycarboxylate intercalation into C3A hydrate phases and the role of sulfate present in cement”; *Cement and Concrete Research*, 40. pp. 45-57.
- Roy D. M., Arjunan P., Silsbee M. R. (2001) “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete”; *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1809-1813.
- Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. (2011), “Sustainable cement production at present and future”, *Cement and Concrete Research*; 41, pp. 642–650.
- Schöler A., Lothenbach B., Winnefeld F., Zajac M. (2015) “Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder” *Cement and Concrete Composites*, 55, pp.374–382.
- Sharfuddin A., Obada K., Wendy A., 2008. Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods., *Cement and Concrete Composite*, 30:576–582
- Slanicka S. (1999) “The influence of fly ash fineness on the strength of concrete”; *Cement and Concrete Research*, 21, pp. 285-96.
- Snelson D.G., Wild S., O’Farrel M. (2008), “Heat of hydration of Portland Cement-Metakaolin-Fly ash (PC-MK-PFA) blends”; *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 832-840.

- Talero R. (2005), “Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: kinetic and morphological differences”; *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1269-1284.
- Talero R., Rahhal V. (2009); “Calorimetric comparison of portland cements containing silica fume and metakaolin”; *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96, pp. 383-393.
- Yun G., Geert De S., Guang Y., Zhuqing Y., Zhijun T., Kai W., 2013, A microscopic study on ternary blended cement based composites. *Construction and Building Materials*, 46: 28–38.
- Wild S., Khatib J.M., Jones A. (1996) “Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete”; *Cement and Concrete Research*. 26; pp. 1537-1544.
- Winnefeld F., Becker S., Pakusch J., Götz T. (2007) “Effects of the molecular architecture of comb- shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems”, *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 251-262.



Concreto con protección de superficie y expuesto a solución de cloruros: Espesor de recubrimiento equivalente

M. H. F. Medeiros¹, L. V. Real¹, V. A. Quarcioni², P. Helene³

¹ Departamento de Construcción Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com, ligiavr@gmail.com

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasil. E-mail: quarciva@ipt.br

³ Universidade de Sao Paulo (USP), Brasil. E-mail: paulo.helene@concretophd.com.br

Información del artículo

Artículo recibido el 16 de Mayo de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 18 de Agosto de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

RESUMEN

El principal objetivo de las pruebas era obtener el coeficiente de difusión y generar un cloruro de cloruro de entrada en previsión de hormigón con y sin superficie tratada, válido para el período de inicio de la corrosión de penetración de armadura y la difusión de iones. El pronóstico se basa en el estado inestable y algunos resultados indican que un hormigón con este tipo de protección puede aumentar el tiempo de contaminación hasta tres veces. Revestimientos equivalentes también presentados de protección de datos indica que los materiales utilizados en este experimento oscilaron entre 0,3 y 3,4 cm, es decir, los resultados mostraron una gran variación entre la protección de materiales probados.

Palabras clave: concreto armado, ambiente marino, migración de cloruros, vida útil.

RESUMO

O objetivo principal dos testes foi obter o coeficiente de difusão de cloruros e gerar uma previsão de ingresso de cloruros em concretos com e sem superfície tratada, válida para o período de iniciação da corrosão de armaduras e penetração por difusão de íons. A previsão foi baseada no estado não estacionário e alguns resultados indicam que um concreto com esse tipo de proteção pode aumentar o tempo de contaminação em até três vezes. Também foram apresentados dados de cobertura equivalente dos materiais de proteção indicando que os utilizados neste experimento variaram entre 0,3 e 3,4 cm, ou seja, apresentou grande variação de resultados entre os materiais de proteção testados.

Palavras chaves: concreto armado, ambiente marinho, migração de cloruros, vida útil.

ABSTRACT

The main purpose of the experimental tests was to obtain the chloride diffusion coefficient and generate a chloride ingress prediction for surface treated concrete that could be valid during the initiation stage and transport by ions diffusion. The prediction was based on non steady-state conditions and some of the results indicated that a concrete with this type of protection can extend the chloride ingress up to three times. Data showed in this work indicated the equivalent cover of the surface treatment, ranging between 0.3 and 3.4 cm, showing large variations in results among the surface treatment materials tested.

Keywords: reinforced concrete, marine environment, chloride migration, service life.

Autor de correspondencia: Marcelo Medeiros

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de protección de superficie en el concreto es una posibilidad de aumentar la vida útil de estructuras expuestas a ambientes marinos. Ese tipo de protección inhibe la penetración de agentes agresivos por difusión, migración y absorción por capilaridad.

Los materiales de protección de superficie para concreto pueden ser clasificados em tres grupos: hidrofugantes (repele el agua), bloqueadores de poros (reaccionan con algunos componentes solubles del concreto y forman productos insolubles) y formadores de película (forman una película continua en la superficie del concreto). La Figura 1 ilustra esos tres grupos de protección de superficie.

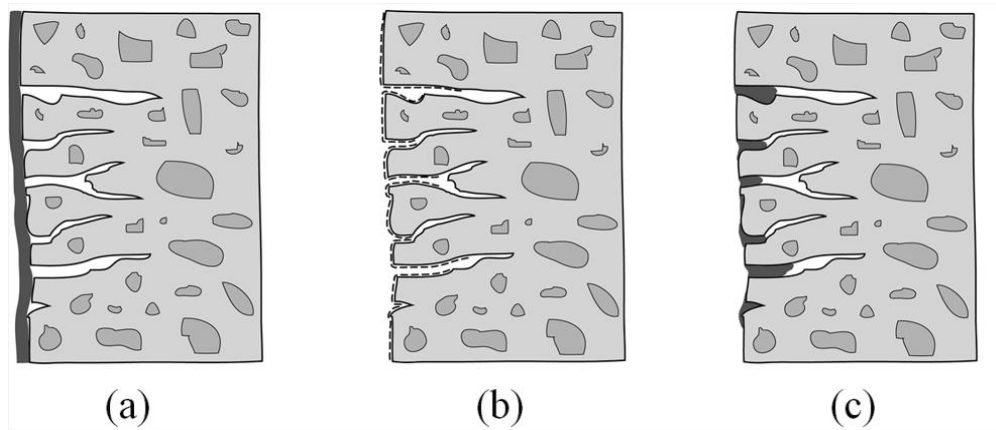


Figura 1. Grupos de tratamiento de superficie para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrogufantes de superficie (adaptado de Keer, 1992).

1.1 Formadores de película:

Los formadores de película presentan la ventaja de proveer una barrera física en la superficie del concreto, que lo aísla de agentes agresivos del ambiente externo. Esos productos exigen un sustrato homogéneo y liso con poros de dimensión máxima igual a 0,1 mm. Eso significa que son capaces de cubrir fisuras de hasta 0,1 mm. Sin embargo, la película se rompe si el concreto se fisura despues de ser pintado. Además de eso, si el concreto tiene elevada humedad interna antes de la aplicación, la película no permite que el concreto se seque. Eso puede deteriorar la película de protección, causando la formación de burbujas debido a la presión de vapor de la humedad interna. Desde el punto de vista arquitectónico, ese grupo de tratamientos de superficie modifica la estética de la estructura adicionando brillo o color a la superficie del concreto, que algunas veces es deseable y en otras no (Helene, 2000).

Ese grupo de tratamiento de superficie (formador de película) fué intensamente estudiado en los últimos quince años. Delucchi *et al.* (1998) estudiaron la importancia de los parámetros E (módulo de elasticidad) y η (viscosidad) en la adherencia de la película. Seneviratne *et al.* (2000), utilizando analisis termo-mecánica, sugieren que la película de mayor éxito es aquella con capacidad de mantener sus propiedades elastoméricas a lo largo del período necesario de exposición y sobre una amplia gama de temperaturas operacionales. Uemoto *et al.* (2001) mostraron la correlación entre la cantidad en volumen de pigmento de tinta y su permeabilidad al agua. Al-Zahrani *et al.* (2002) mostraron que los sistemas de protección por formación de película presentan eficiencia de inhibición de la corrosión acelerada coherente a los resultados

obtenidos de las propiedades físicas, en particular, absorción de agua, permeabilidad y penetración de iones cloruro. Medeiros y Helene (2009) afirman que la determinación del coeficiente de difusión de cloruros permite una comparación cuantitativa de los sistemas de protección y, por eso, su cálculo debe ser canalizado en ensayos de migración. Los formadores de película son probablemente los más utilizados en la industria de la construcción y esa debe ser la razón para ser extensamente estudiados en comparación a los demás sistemas de protección de superficie.

1.2 Hidrofugantes de superficie:

Agentes repelentes de agua o hidrofugantes siempre resultan de resina de silicon que son químicamente combinadas con la base de concreto. Actualmente, los materiales mas utilizados son los silanos, siloxanos oligoméricos y la mezcla de esos dos compuestos (Medeiros; Helene, 2008).

Químicamente, los silanos son formados por pequeñas moléculas que contienen un átomo de silicio y los siloxanos son pequeñas cadenas de pocos átomos de silicio, cuyas moléculas contienen grupos alcoxi (orgánicos) conectados al átomo de silicio. Los silanos y siloxanos reaccionan con los silicatos del concreto, formando una adherencia estable (1997) (Figura 2). Medeiros *et al.* (2009) mostraron que la penetración de agentes hidrofugantes es mejor en las fases de grietas que en las de contacto con la forma, debido a la mayor permeabilidad del primero. Jacob; Hermann (1998), Batista (1998) y Moriconi *et al.* (2002) presentaron una amplia revisión bibliográfica sobre agentes hidrofugantes. El uso de esos agentes en la industria de la construcción civil está creciendo en un índice interesante y ha sido razonablemente estudiado. Sin embargo, hay algunos itens aun en estudio, como la influencia del mecanismo de penetración de agua (succión por capilaridad y permeabilidad) en la eficacia del tratamiento con hidrofugantes (Medeiros; Helene, 2008).

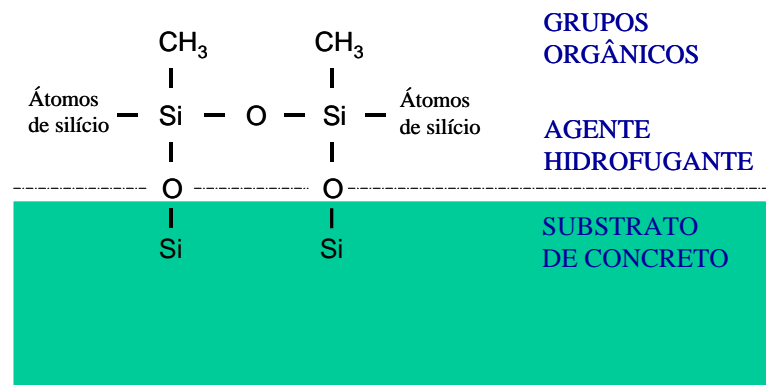


Figura 2. Combinación química del agente hidrofugante con concreto (adaptado de Vries and Polder, 1997).

1.3 Bloqueadores de poros

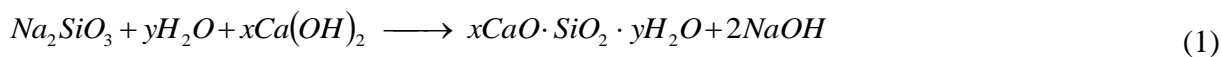
Bloqueadores de poros, como silicato de sódio, son usados en la industria del cemento para varias aplicaciones. Por ejemplo: como activador de cemento de escória, como aditivo protector de fibras vegetales en compuestos de cemento, como endurecedor de superficie para pisos industriales y como sistema de protección de superficie para concreto (Mehta, Monteiro, 2008; Brough, Atkinson, 2002; Jones, 2002; Toledo *et al.*, 2003; Melo Neto, 2009).

Así como este grupo de tratamiento es conocido hace varios años, poca información técnica y científica fue publicada sobre este asunto. Por otro lado, muchos productos de ese tipo son comercializados e indicados para la protección de superficies de concreto. Thompson *et al.* (1997) explicaron las tres teorías de como los silicatos actúan para mejorar el desempeño del concreto:

- Precipitación de SiO₂ en los poros;
- Formación de un gel expansivo, similar al formado en la relación álcali silicato, dentro de los poros;
- Reacción de los silicatos con el hidróxido de calcio presente en los poros formando silicato de calcio hidratado.

La última teoría es la más aceptada actualmente. De ese modo, teóricamente, los bloqueadores de poros son productos compuestos por silicatos, que penetran en los poros superficiales y reaccionan con la portlandita formando C-S-H. El silicato de sodio es el producto más usado para esa finalidad.

De acuerdo con Thompson *et al.* (1997), la ecuación 1 representa lo que acontece cuando la solución de silicato de sodio penetra en los poros del concreto.



Así, ese tratamiento forma una capa menos porosa en la capa superficial del concreto, modificando la penetración de agua en el material. Ese tratamiento requiere que el silicato de sodio reaccione con la portlandita [Ca (OH)₂]. Por tanto, es fácil entender que en el concreto carbonatado la reacción de la ecuación 1 no ocurra, pues el Ca (OH)₂ de la capa más externa ya reacciona con el CO₂, formando CaCO₃. Eso fue explicado por Kagi y Ren (1995), que afirmaron que una reducción significativa de la penetración de agua en el concreto debido al tratamiento con solución de silicato solo se obtiene si el concreto es muy joven y si repetidas aplicaciones fuesen realizadas para rellenar los poros capilares. Otra contribución de Kagi y Ren (1995) es relacionada con la permeabilidad al vapor de agua del sustrato, que no es significativamente afectada por los silicatos, porque ellos no bloquean los poros capilares totalmente. Ibrahim *et al.* (1997) concentraron su trabajo en estimar el tiempo necesario para que las muestras de concreto armado tratadas con silicato de sodio se fisuraran por corrosión y concluyeron que los resultados fueron semejantes a los de las muestras no tratadas (patrón). No obstante, los resultados de Ibrahim *et al.* (1997) no están de acuerdo con los de Thompson *et al.* (1997) sobre la absorción de agua. Es importante resaltar que Ibrahim *et al.* (1997) no informó la concentración de silicato de sodio que utilizaron en el estudio ya que el uso de una baja concentración puede influir en sus resultados. Thompson *et al.* (1997) compararon las concentraciones de silicato de sodio en los productos de protección y el valor alrededor del 26% presentó mayor eficiencia.

Es importante enfatizar que los bloqueadores de poros deben ser aplicados luego que todas las cargas de proyecto estén actuando y las fisuras y microfisuras ocurran. No obstante, los efectos del ambiente pueden causar más fisuras. Se hubiere fisuras (grandes o suficientes para ser visibles) antes de la aplicación de los silicatos, es necesario repararlas antes de realizar el tratamiento de la superficie. Si hay fisura luego del tratamiento, estas deben ser tratadas inmediatamente debido a la ruptura de la capa de baja porosidad. Ese es el principal problema del tratamiento de superficie (hidrofugantes, bloqueadores de poros y formadores de película): ellos no absorben la deformación del sustrato de concreto. Eso significa que la capa de protección formada se rompe al concreto fisurarse, causando inmediata imperfección del sistema de protección.

Es importante recordar que, independientemente de la dimensión de la fisura, los poros restantes serán menores si no hubiese el bloqueador de poros en la superficie. Entonces, el ataque del medio ambiente será aislado en el área fisurada y las otras regiones continuaran protegidas.

En general, se puede decir que son necesarias más informaciones sobre la capacidad de protección de silicatos aplicados en superficies de concreto armado. Por otro lado, el uso de ese tipo de protección en el concreto es amplio y su aplicación contribuye para la elevación de la vida útil, una vez que pueden ser aplicados como métodos de prevención o corrección.

De modo general, el abordaje de la vida útil ha evolucionado significativamente durante los últimos años (Castro-Borges, Helene, 2007) y eso se debe principalmente a la introducción de mas parámetros cuantitativos que ven años anteriores. Esos parámetros incluyen nuevos conceptos como operacionalidad, funcionalidad, seguridad, confiabilidad y durabilidad.

Este trabajo está enfocado en la evaluación de sistemas de tratamiento de superficies de concreto sometidas a la exposición de agua contaminada con cloruro de sódio y en condiciones de migración. De ese modo, el principal objetivo de este artículo es indicar una manera de estimar la influencia de los tratamientos de superficie del concreto en la vida útil de una estructura de concreto armado expuesta a la contaminación por cloruros.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Concreto del sustrato

El cemento utilizado para la confección del sustrato fue un cemento compuesto por escoria (CPII-E 32). La Tabla 1 presenta la caracterización física y química de este material.

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas del cemento CPII-E 32

(a) Composición química (%)										
Cemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cal livre	Álcalis totales como Na ₂ O _e *
CPII-E 32	22,80	6,75	2,45	56,40	3,20	1,83	0,12	0,61	0,44	0,52
* Na ₂ O _e = Na ₂ O + 0,658 K ₂ O										
(b) Propiedades físicas										
Cemento	Peso específica (23°C)	Finura			Tiempo de pega		Resistencia à compresión – NBR 7215/96 (MPa)			
	(kg/dm ³)	Pasante 75µm (%)	Finura Blaine (m ² /kg)		Início (h:min)	Fin (h:min)	3 días	7 días	28 días	
CPII-E 32	3,02	3,6	395		3:40	5:30	15,9	24,0	37,5	

El concreto utilizado está descrito en la Tabla 2. Las probetas fueron compactadas con el uso de una mesa vibratoria para asegurar la compactación adecuada. El proceso de curado usado consistió en acondicionar las probetas en cámara húmeda con U.R. igual a 100% y temperatura de 24°C por 91 días. Ese período fue adoptado para promover un alto nivel de hidratación en el concreto y eliminar la influencia de un curado adicional que podría ocurrir durante los ensayos debido a la exposición al agua, o que podría afectar la série de referencia en relación a las séries con superficie tratada.

Tabla 2. Características del concreto del sustrato

Proporción cemento:agregados	Relación agua/cemento	Cemento (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Piedra (kg/m ³)	Densidad en estado fresco (kg/m ³)	Resistencia à compresión (MPa) – 28 días
1 : 4,5	0,52	358	644,4	966,6	2155	32

2.2 Materiales de protección de superficie

Los materiales de tratamiento de superficie utilizados en este estudio estan descritos en la Tabla 3. La Tabla 4 presenta el tipo de curado, el número de capas y el consumo recomendado por los fabricantes de cada material. Vale destacar que en el experimento existen representantes de los tres grupos de sistemas de protección abordados en este trabajo.

Tabla 3. Características de los materiales de protección de superficie

Producto	Tipo de sistema	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad CPs (temperatura = 20°C)	Tiempo de secado (h)
Silano/siloxano	Hidrofugante de superficie	1,0	10	2 - 6
Acrílico	Formador de película	0,9	45	1
Poliuretano	Formador de película	0,95	32	8
Silicato de sódio	Bloqueador de poros	1,3	20	2
Silano/siloxano + Acrílico	Doble	---	---	---

Tabla 4. Tipo de curado y consumo recomendado pelos fabricantes

Producto	Consumo (g/m ² de revestimento)	Número de capas	Tipo de cura
Silano/siloxano disperse em agua	300	1	Evaporação da agua + reação
Acrílico disperse em solvente	150	2	Secagem
Poliuretano	180	2	Reação química
Silicato de sódio	200	2	Reação química
Silano/siloxano + Acrílico	---	---	---

2.3 Estimativa do coeficiente de difusión por ensayo de migración

El método utilizado para estimar el coeficiente de difusión de cloruros fue basado en el procedimiento descrito por Luping & Nilsson (1992), que consiste en la medición de la profundidad de penetración de cloruros libres en las capas de concreto fracturadas en el sentido del flujo de cloruros, utilizando aspersion de una solución acuosa de 0,1 M de AgNO₃ (Andrade *et al.*, 1999) y en la aplicación da Ecuación 2. Como el método se basa en la profundidad de

penetración de cloruros libres, se debe destacar que los cloruros fijos son ignorados y que existe la posibilidad de liberación de una parcela de los cloruros fijos, volviéndose libres. Eso hace que el método genere aseveraciones, de cierta forma, contra la seguridad, por tanto, esta práctica fue implementada por la facilidad de ensayo y por el hecho de que en el momento de la evaluación es la penetración de los cloruros libres que efectivamente influye en la despasivación del acero.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - a x_d^b}{t} \quad (2)$$

Donde: D es el coeficiente de difusión (cm²/s), R es la constante de los gases (8,31 J/molK), T es la temperatura (298 K), z es la valencia del ión (para cloruros es igual a -1), F la constante de Faraday (96,5 J/Vmol), E es el campo eléctrico (-600V/m), x_d la profundidad de penetración de cloruros (m) y t el tiempo de ensayo. Para E = -600V/m e T = 298 K, a = 1,061 e b = 0,589. El modelo es basado en el estado no estacionario de transporte de iones cloruros.

Fueron extraídas tres rebanadas centrales de 50 mm de cada probeta cilíndrica (φ 100 mm x 200 mm). Enseguida, las muestras fueron mantenidas en una estufa a 60°C hasta obtener peso constante. Entonces los materiales de protección de superficie fueron aplicados sobre las superficies circulares de las probetas. Siete días después a la aplicación de los tratamientos, las probetas fueron saturadas conforme indica el procedimiento de la ASTM C 1202/12 (2012). En todos los casos fueron seguidas las orientaciones de los fabricantes en cuanto a la cantidad de material a ser aplicada.

La rebanada de 50 mm de Espesor fue posicionada entre dos células de acrílico. Una célula fue rellena con solución 0,3 N NaOH y la otra con solución de 3,0% de NaCl. Las células fueron conectadas a una fuente de tensión con diferencia de potencial de 30 V y mantenidas en esa condición durante 30h. El esquema gráfico del ensayo acelerado de migración de cloruros está presentado en la Figura 3.

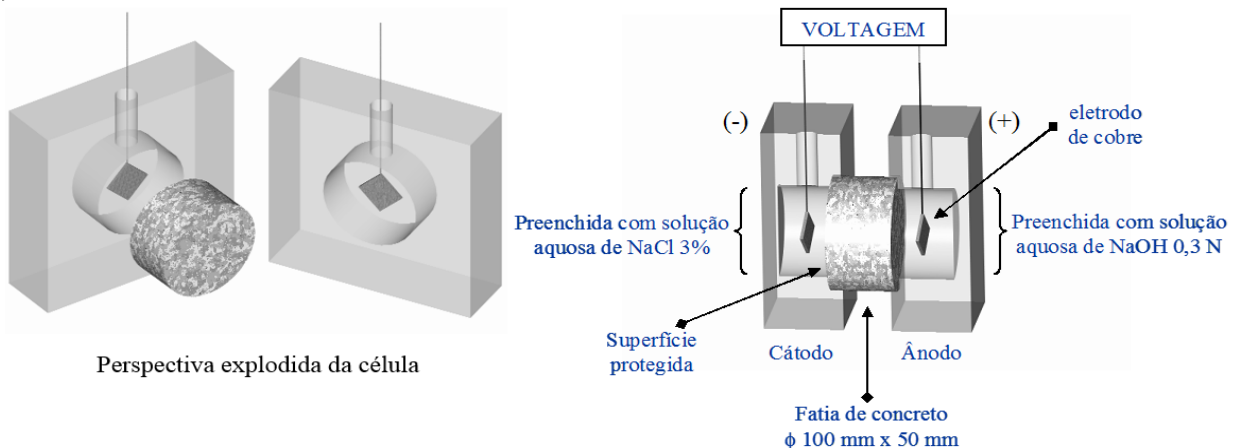


Figura 3. Arreglo experimental del ensayo de migración de cloruros.

Enseguida, las rebanadas fueron fracturadas y la profundidad de penetración de cloruros libres fue determinada conforme ilustra la Figura 4. Andrade *et al.* (2000), comparando los métodos para determinación del coeficiente de difusión de cloruros en el estado estacionario utilizando el ensayo de migración acelerada, indicó que el ensayo recomendado por Nilsson & Luping (1992) presentó una mejor trazabilidad de resultados, justificando así el método de ensayo presentado en este artículo.



Figura 4. Rebanada de probeta posterior a la ruptura y aplicación de solución acuosa de 0,1 M de AgNO_3 .

3. RESULTADOS

La Figura 5 presenta los resultados de los coeficientes de difusión determinados por el método de Luping & Nilsson (1992) para concreto saturado, conforme el experimento fue realizado. Por tanto, la movilidad de iones cloruro causada por efectos de absorción o permeabilidad no existio.

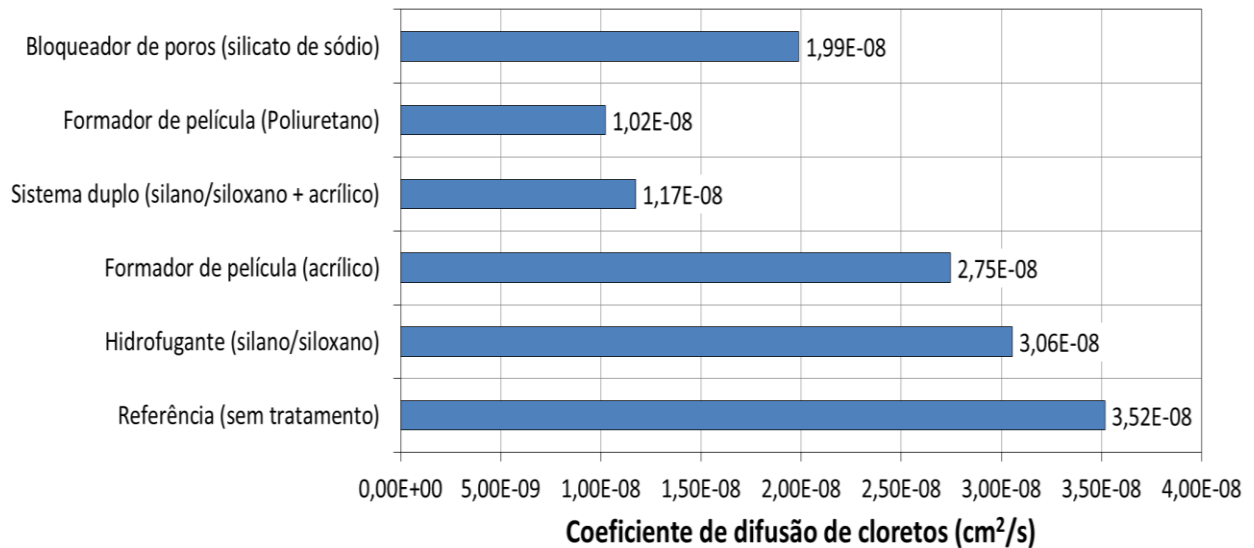


Figura 5. Coeficiente de difusión de cloruros para concretos con superficies tratadas y no tratadas.

De manera general, los coeficientes de difusión de las superficies tratadas claramente se redujeron. Esa reducción aumenta la vida de servicio de la estructura cuando es expuesta a un ambiente marino. No entanto, hubo una gran diferencia en la eficiencia, dependiendo del tratamiento utilizado.

Es importante enfatizar que, excepto por el revestimiento de poliuretano, el sistema doble (hidrofugante de superficie + revestimiento acrílico) es mucho mas vantajoso cuando es comparado con los sistemas únicos debido a la barrera doble formada en esta categoria de protección. Eso ocurre porque, cuando el ion cloruro pasa la capa del acabado acrílico, existe todavía el tratamiento de silano/siloxano, que tiene alguna capacidade para inhibir la penetración de iones cloruro para el interior del concreto.

En terminos de funcionamiento, los formadores de película de calidad son mas eficientes porque actuan como una capa de separación de la pieza de concreto del contacto con el medio externo. Este es el caso del poliuretano indicado en la Figura 5. Por otro lado, los sistemas de poros abiertos como los silicatos e hidrofugantes tienden a presentar menor capacidad de protección acompañado de películas de baja calidad como es el caso del acrílico usado en este estudio.

La Tabla 5 muestra el indice de reducción de los coeficientes de difusión de cloruros de cada tratamiento. El sistema doble redujo el coeficiente de difusión de cloruros en 67% en relación al sustrato de referencia. El revestimiento de poliuretano fue la protección más eficaz, reduciendo el coeficiente en 71%. Es importante destacar que este resultado no puede ser universalmente considerado porque la eficiencia del tratamiento no depende solo del tipo de resina que lo compone. Esto está de acuerdo con Vipulanandan y Liu (2005), que afirman que para un tipo específico de resina la eficacia para reducir la penetración de cloruros puede ser altamente distinta.

El silano/siloxano redujo apenas en 13%, indicando que este material no ejerce grande influencia en la penetración de cloruros. Por tanto, vale comentar que de acuerdo con Medeiros y Helene (2009), y Medeiros y Helene (2008), agentes hidrofóbicos reducen significativamente la sortividad del concreto, que es el mecanismo principal de protección de ese tipo de tratamiento. De ese modo, cuando se especifica un hidrofugante de superficie, el foco está en reducir la sorción capilar, que puede transportar agua contaminada por cloruros para el interior de concreto. Entonces, el ensayo de penetración de cloruros en condiciones de saturación del concreto es transporte de cloruros por migración no ensaya o simula el puento fuerte de actuación de este producto, aun cuando haya sido registrado 13% de reducción en el coeficiente de difusión de cloruros para este material. Medeiros *et al.* (2015) muestran en su trabajo el uso de la técnica de goniometria para ensayar la capacidad de que los hidrofugantes aumenten el ángulo de contacto del agua con el sustrato tratado, reduciendo la afinidad con el agua y confirmando la hidrorrepelencia al concreto.

Tabla 5. Porcentaje de reducción de penetración de cloruros para cada sistema de protección

Sistema de protección	Taxa de reducción do coeficiente de difusión de cloruros (%)
Hidrofugantes (Silano/siloxano)	13
Formadores de película (Acrílico)	22
Sistema duplo (silano/siloxano + acrílico)	67
Formadores de película (Poliuretano)	71
Bloqueadores de poros (Silicato de sódio)	43

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La previsión de la vida útil de estructuras de concreto armado es un área que necesita de avances. Actualmente, existen muchos modelos desarrollados, sin embargo, sus validaciones aun precisan ser más estudiadas y divulgadas.

Este trabajo, es presentada una previsión del ingreso de cloruros basado en el estado no estacionario. El método propuesto permite correlacionar el tiempo de ingreso de cloruros a partir del recubrimiento del concreto, lo que puede ser una herramienta útil para concebir estructuras de concreto armado sometidas a condiciones de transporte de cloruros por migración y por difusión. Su extrapolación a otros mecanismos de penetración, tales como absorción, convección, o una mezcla de estos debe ser cuidadosa. Es necesario realizar mas pesquisas sobre esos fenómenos

para desarrollar esas consideraciones. Aun cuando el modelo usado ainda precise de mejoras, como la aplicación del factor de edad (aging factor) es la variación del C_s a lo largo del tiempo, su aplicación es válida porque permite una comparación cuantitativa entre los diferentes materiales y produce una estimación de tiempo de ingreso de los cloruros por difusión en la red de poros del concreto.

El método tiene origen en la segunda ley de Fick (Ecuación 3), cuyo desarrollo está presentado en las Ecuaciones de 3 a 5.

Helene (2000) también presentó las Ecuaciones 4 y 5 basadas en la segunda ley de Fick. Estas ecuaciones fueron utilizadas en este estudio para analizar los resultados de los coeficientes de difusión, permitiendo la construcción de un gráfico que correlaciona la profundidad de penetración de cloruro con el tiempo (Figura 6).

$$\frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{e_{Cl}}{2\sqrt{D_{Cl} t}}\right) \quad (3)$$

Donde: C_{Cl} = cantidad de cloruros en la profundidad e_{Cl} , en el tiempo t (C_{Cl} en %); C_s = contenido de cloruros en la superficie del componente estructural de concreto, admitido como constante (%); C_0 = contenido inicial de cloruros en el interior del componente estructural de concreto; D_{Cl} = Coeficiente de difusión de cloruros (cm^2/s); t = duración del tiempo considerado (s); e_{Cl} = profundidad alcanzada por el frente de cloruros con contenido de cloruros igual a C_{Cl} (cm).

Considerando z una incógnita cualquiera (arbitrando la expresión dentro de la función erf) es aislando e_{Cl} , se obtiene la Ecuación 4.

$$z = \frac{e_{Cl}}{2\sqrt{D_{Cl} t}} \Rightarrow e_{Cl} = 2z\sqrt{D_{Cl} t} \quad (4)$$

Incluyendo z en la Ecuación 3 y aislando erf (z), se llega a la Ecuación 5.

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - \frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (5)$$

En la construcción de la Figura 6 se considero $C_0 = 0$, es decir, el concreto no tenía cloruro alguno en el momento del vaciado.

Fijando un valor para C_s considerando C_{Cl} igual al límite crítico para la despasivación de las armaduras por corrosión causada por ataque por cloruros, se obtiene la función error de Gauss [erf (z)]. Consultando Tablas que relacionan erf(z) con z , se obtiene el valor de z . Sustituyendo este valor de z y el coeficiente de difusión de cloruros en la Ecuación 4, se obtiene una Ecuación que relaciona la profundidad en que el valor límite (para la despasivación de las armaduras) es afectado con el tiempo necesario para que esto ocurra. Este fue el razonamiento seguido para la elaboración de la Figura 6.

Es importante destacar que la previsión de tiempo de ingreso de cloruros presente en este artículo es válida solamente en las condiciones a continuación:

- La estructura del concreto armado está en el inicio de su vida útil (a partir del período de iniciación);

- El agente de degradación mas rápido es el ataque por cloruros;
- No hay factores externos accidentales que hayan afectado las propiedades del recubrimiento de concreto;
- El contenido limite de cloruros para la despasivación del acero es 0,4% en relación a la masa de cemento y fué el escogido porque es el especificado en algunos documentos técnicos importantes (Boletin 152, 1992; BS 8110-1, 1997; EN 206-Part 1, 2007).

Es importante dar énfasis al hecho de que el coeficiente de difusión haya sido obtenido por un proceso de migración (por aplicación de una ddp) en estado no estacionario, siendo, portanto, un parámetro bastante diferente del transporte real de cloruros en el concreto, lo que restringe y limita su aplicación directa en un modelo de previsión de vida útil. Por tanto, el uso de resultados comparativos dentro del experimento realizado es posible y coherente.

A pesar de los ciclos de variación de la concentración de cloruro en la superficie de concreto (De Coss et al., 1998), una restricción de este trabajo fue la fijación de la concentración de cloruros en la superficie (C_s) igual a 0,9%, que fue citado por Helene (1993) como adecuado para concretos entre 20 y 30 MPa, relación agua/cemento entre 0,48 e 0,68 y consumo de cemento entre 280 y 400 kg/m³, condición en que el concreto utilizado en el experimento de este artículo encaja.

Otra simplificación del método es solo considerar el proceso de difusión en la previsión de penetración de cloruros, de ese modo, las previsiones realizadas son más adecuadas para un concreto sumergido en agua de mar que en estructuras sometidas a condiciones de proximidad con el mar.

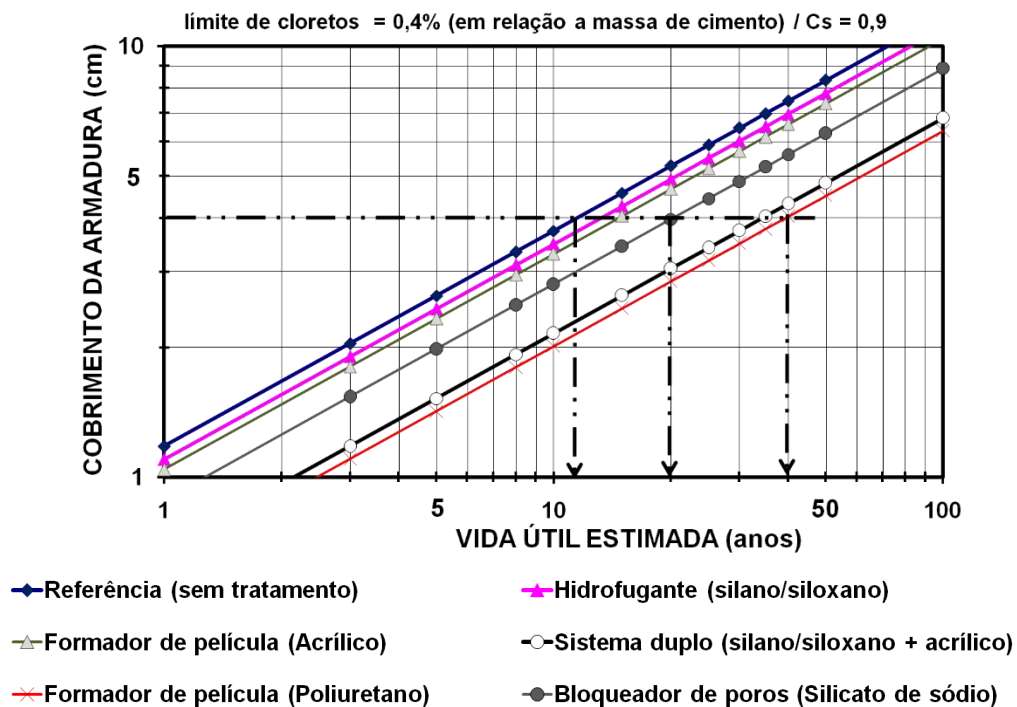


Figura 6. Relación entre la vida útil estimada y el recubrimiento de concreto relativo a penetración de cloruros (profundidad donde 0,4% en peso de cemento fue afectado).

Es posible observar en la Figura 6 que para las estructuras con recubrimiento igual a 4 cm, la vida útil estimada es alrededor de 12 años para el ingreso de cloruros por difusión, pudiendo alcanzar hasta 40 años dependiendo del sistema de protección aplicado (puede haber aumento en el tiempo

de hasta tres veces). Es importante enfatizar que la protección de poliuretano (formador de película) y los sistemas dobles presentaron mejores resultados que otros tratamientos probados en este estudio.

Es importante relatar que Castellote y Andrade enfatizan que varios modelos de previsión de vida útil fueron analizados en diferentes workshops dentro de la RILEM TC 178-TMC y que innumerables incertezas permanecen, lo que impide, en el actual estado del arte, de hacer exactas previsiones a largo plazo basados en experimentos de corta duración (Castellote, Andrade, 2006). Algunos años pasaron desde 2006, por tanto, se consideran tales incertezas aun existan. De ese modo, las previsiones de vida útil realizadas en este trabajo no deben ser interpretadas como valores precisos e absolutos, porque la metodología tiene elementos de contorno como ocurre en cualquier modelo de previsión de vida útil.

Una buena manera de pensar en términos de protección de superficie fue propuesta en Medeiros y Helene (2009), donde la protección es representada en recubrimiento equivalente, que consiste en cuantos cm de recubrimiento de concreto es igual a un revestimiento de un determinado sistema de protección. Es decir se una pieza de concreto es protegida con un sistema de protección que tiene un recubrimiento equivalente X cm, eso significa que es como si ella tuviera un incremento de X cm, desde que el sistema de protección tenía sus propiedades de desempeño mantenidas a lo largo del tiempo, que en la práctica solo es obtenido previendo renovación y mantenimiento periódico de la protección de la superficie. Por ejemplo: si el concreto armado fuese protegido con un formador de película a base acrílico, es como si el recubrimiento de la armadura existente fuese crecido en 5 mm.

La Figura 7 muestra el recubrimiento equivalente para cada tratamiento estudiado. Esos datos están relacionados con el concreto del sustrato utilizado en este estudio.

Este tipo de razonamiento puede ser el camino para fundamentar la aplicación de sistemas de protección de superficie en condiciones en que la estructura de concreto armado ya este concluida y con Espesor de recubrimiento por debajo de lo especificado por norma. Este tipo de situación puede ser generado en los casos de estructuras construidas con bajo control de calidad y casos de estructuras construidas y no concluidas por motivos como la quiebra de la constructora.

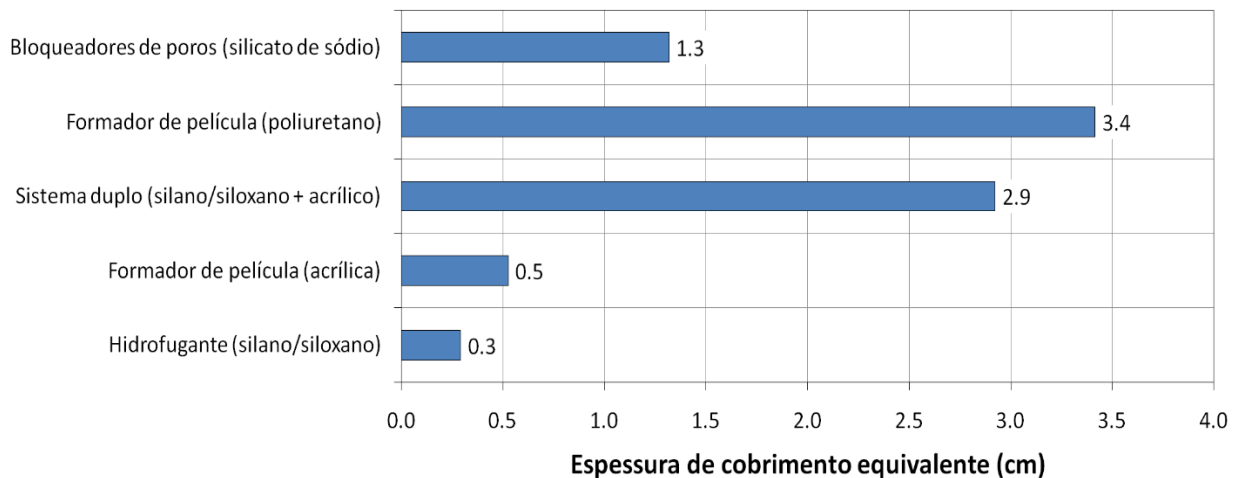


Figura 7: Espesor del recubrimiento equivalente para cada sistema de protección relacionado al concreto del sustrato – $C_s = 0,9\%$ (coeficiente de difusión de cloruros por el método de Luping y Nilsson, 1992).

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones aquí expresadas se aplican a las características de este trabajo y de los materiales usados. Cualquier extrapolación para otros materiales o circunstancias debe ser realizada cuidadosamente.

La previsión de vida útil para el inicio de la corrosión del concreto con tratamientos de superficie fue obtenida en el estado de migración no estacionaria y será válida apenas en la fase de iniciación mencionada.

La contaminación por cloruros en una estructura de concreto armado expuesto a un ambiente marino es una de las maneras de degradación más difíciles de corregir. La penetración de iones en el concreto ocurre por difusión, por migración o por penetración de agua contaminada por cloruros. A partir de esta investigación las siguientes conclusiones pueden ser obtenidas:

- La protección de superficie del concreto puede ser un medio eficiente de inhibición de la penetración de cloruros en concreto. Consecuentemente, los sistemas de protección deben ser usados para aumentar la vida útil del concreto armado en ambientes influenciados por el mar, como edificios costeros.
- Los resultados indican que el sistema de protección más eficiente puede reducir el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto armado en 71%.
- Es importante destacar que los resultados indican que el uso de un sistema de protección de elevada eficiencia puede aumentar más de tres veces la vida útil de una estructura de concreto armado. Por tanto, ese nivel de aumento en la vida útil está relacionado a las condiciones utilizadas en este trabajo y diferentes resultados pueden ser obtenidos en otras condiciones de ensayos.
- Gráficos (como la Figura 6) que relacionan la vida útil estimada con la profundidad en que la concentración de cloruros alcanzó el límite de despasivación del acero son los medios más eficaces e ilustrativos de presentar los resultados de los coeficientes de difusión de cloruros.
- Los resultados de este artículo indican que el hidrofugante de superficie redujo en 13% la penetración de cloruro en el concreto. Pero es importante resaltar que este tratamiento mostro la menor capacidad de reducir el coeficiente de difusión de cloruros.
- El revestimiento de poliuretano y el sistema de doble protección fueron los tratamientos de superficie que presentaron la mejor eficiencia en la reducción de la penetración de cloruros (71% y 67% de reducción del coeficiente de difusión de cloruros, respectivamente).

Este trabajo propone una forma interesante de interpretar los resultados del coeficiente de difusión de cloruros. La posibilidad de hacer previsiones de vida útil, facilidad de interpretación y correlación entre el recubrimiento de concreto y la vida útil estimada son las ventajas de este método. De esa forma, el procedimiento de interpretación puede tornarse una herramienta importante para prever la vida útil de las estructuras de concreto armado. No obstante, es importante observar que esa es una aplicación basada apenas en el coeficiente de difusión obtenido por un ensayo de migración de cloruros. Como considerar otros fenómenos aun es desconocido y necesita ser más investigado para aprimorar la aproximación de las estimativas de previsión de vida útil con la realidad.

Otro punto positivo del trabajo es la conversión de la capacidad de protección del sistema de protección con el recubrimiento equivalente en concreto del sustrato. Este tipo de abordaje posibilita inferir cual es el Espesor de recubrimiento adicional que un dato del sistema de protección equivale. Por tanto, no se puede dejar de resaltar que este tipo de conversión solo es

válido se es garantizado que el material de protección de superficie mantengan sus propiedades de protección a lo largo del tiempo de vida útil de la estructura a ser protegida y eso solo ocurre si la renovación del sistema se realiza periódicamente.

6. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecemos a la Escuela Politécnica de Sao Paulo (POLI-USP), à Universidad Federal de Paraná (UFPR), al Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) y a la Fundação de Amparo a Pesquisa del Estado de Sao Paulo (FAPESP) por hacer este estudio posible y apoyarlo financieramente. Los autores también agradecen a la arquitecta Dominique E. Giordano Gonzalez por las ilustraciones.

7. REFERENCIAS

- Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Ibrahim, M., Saricimen, H., Sharif, F. M. (2002), “*Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete*”, Cement and Concrete Composites, v. 24, pp. 127-137.
- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (1999), “*Relation between colorimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1201-91*”, Cement and Concrete Research, v. 29, pp. 417–21.
- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (2000), “*Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests – part I: comparison between several methods of calculation*”, Materials Structures, v. 33, pp. 21–28.
- ASTM C 1202 – 2012 Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials, USA, 2012.
- Batista, M. (1998), “*Siloxane and silane—perfects hydrophobics agents for all situations*”, Recuperar Magazine, v. 23, pp. 14–19.
- Boletín 152 Durability of concrete structures. Conite Euro-Internacional Du Béton. CEB 152: Europe, 1992.
- Brough, A. R., Atkinson, A. (2002), “*Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars - Part I. Strength, hydration and microstructure*”, Cement and Concrete Research, v. 32, pp. 865–879.
- BS 8110-1 Structural use of concrete. Code of practice for design and construction. British Standards Institution, England, 1997.
- Castellote, M., Andrade, C. (2006), “*Round-Robin test on methods for determining chloride transport parameters in concrete*”, Materials and Structures, v. 39, pp. 955–90.
- Castro-Borges, P., Helene, P. (2007), “*Service life concepts of reinforced concrete structures - New approach*” in: Proceedings of the Corrosion of Infrastructure, 3º, p. 9-14.
- De Coss, R., Murrieta, G., Castro, P. (1998), “*Effect of weather cycles on chloride diffusion in porous concrete*” in: P. Castro, O. Troconis, C. Andrade (Eds.), Rehabilitation of Corrosion Damaged Infrastructure, NACE International, Houston: TX (USA), pp. 285-293.
- Delucchi, M., Barbucci, A., Cerisola, G. (1998), “*Crack-bridging ability and liquid water permeability of protective coatings for concrete*”, Progress in Organic Coatings, v. 33, pp. 76-82.
- EN-206-Part 1 Concrete – Especificación, performance, production and conformity. European Committee for Standardization, Europe, 2007.
- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M., Almusallam, A. A. (1997), “*Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion*”, Construction and Building Materials, v. 11, n. 7-8, pp. 443-451.

- Gjorv, O. E. (2014), *“Durability design of concrete structures in service environments”* (New York, EUA: CRC Press), 2st edn., pp. 249.
- Helene, P. (1993), “Contribuição ao estudo da corrosión em armaduras de concreto armado”, Tese de Livre Docencia, Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, p. 231.
- Helene, P. (2000), *“Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. Manual de Diagnósis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado”* (Barcelona, Espanha: Col·legi d’Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona), 1th edn., p. 87-102.
- Jacob, T., Hermann, K. (1998), *“Protection of concrete surfaces: hydrophobic impregnations”*, *Construcción y Tecnología*, pp. 18–23.
- Jones, J. W. (2002), “Method of Hardening and Polishing concrete floors, walls, and the Like”, United States Patents. Tatent number: US 6,454,632 B1. Sep. 24, 2002.
- Kagi, D. A., Ren, K. B. (1995), *“Reduction of water absorption in silicate treated concrete by post-treatment with cationic surfactants”*, *Building and Environment*, v. 30, n. 2, p. 237-243.
- Bentur, A., Diamond, S., Berke, N. S. (1997), *“Steel Corrosion in Concrete – Fundamentals and Civil Engineering Practice”* (London, Inglaterra: E&FN SPON), 1th edn., pp. 197.
- Luping, T., Nilsson, L. (1992), *“Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field”*, *ACI Materials Journal*, v. 89, n. 1, pp. 49–53.
- Mariconi, G., Tittarelli, F., Corinaldesi, V. (2002), *“Review of silicone-based hydrophobic treatment and admixtures for concrete”*, *Indian Concrete Journal*, v. 76, n. 10, pp. 637-642.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009), *“Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption”*, *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 1476-1484.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2008), *“Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete”*, *Materials and Structures*, v. 41, n. 1, pp. 59-71.
- Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Helene, P. (2009), *“Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions”*, *Marine Structures*, v. 22, pp. 128-141.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009), *“Durability and protection of reinforced concrete”*, *Techne*, v. 151, pp. 50-54.
- Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Figura, A. S., Tissot, F. M., Artioli, K. A. (2015), *“Avaliação da eficiência de sistemas de protecção de superfície para concreto: absorción de agua, migración de cloruros e ângulo de contato”*, *Matéria (UFRJ)*, v. 20, pp. 145-159.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2008), *“Concrete: Structure, Properties, and Materials”*, (New Jersey, EUA: Prentice Hall), 3th edn.
- Melo Neto, A. A., Cincotto, M. A., Repette, W. L. (2009), *“Drying autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement”*, *Cement and Concrete Research*, v. 38, pp. 565-574.
- Seneviratne, A. M., Sergi, G., Page, C. L. (2000), *“Performance characteristics of surface coatings applied to concrete for control of reinforcement corrosion”*, *Construction and Building Materials*, v. 14, pp. 55-59.
- Thompson, J. L., Silsbee, M. R., Gill, P. M., Scheetz, B. E. (1997), *“Characterization of silicate sealers on concrete”*, *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 10, pp. 1561-1567.
- Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., George, L. (2003), *“England and Karen Scrivener Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability”*, *Cement and Concrete Conposites*, v. 25, n. 2, pp. 185-196.

- Uemoto, K. L., Agopyan, V., Vittorino, F. (2001), “*Concrete protection using acrylic latex paint: Effect of the pigment volume content on water permeability*”, *Materials Structures*, v. 34, pp. 172-177.
- Vipulanandan, C., Liu, J. (2005), “*Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment*”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 1754–63.
- Vries, J., Polder, R. B. (1997), “*Hydrophobic treatment of concrete*”, *Construction and Building Materials*, v. 11, n. 4, pp. 259-265.



Concreto reciclado: una revisión

W. Martínez-Molina¹, A. A. Torres-Acosta², E. M. Alonso-Guzmán¹, H. L. Chávez-García¹, H. Hernández-Barrios³, C. Lara-Gómez¹, W. Martínez-Alonso⁴, J. T. Pérez-Quiroz², J. A. Bedolla-Arroyo⁵, F. M. González-Valdéz¹

¹Cuerpo Académico Consolidado 147, Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040. E-mail: eliamercedesalonso@gmail.com

²Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México, 76703.

³Departamento de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

⁴Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, México Distrito Federal, 04510 y Universidad de Texas en Austin, Texas, Estados Unidos de Norteamérica, 78712.

⁵Facultad de Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

Información del artículo

Artículo recibido el 22 de Abril de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 25 de agosto de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, 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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

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.

RESUMO

A geração de resíduos sólidos de concreto, considerados como entulho, está se tornando um problema ambiental. Este material de construção é composto principalmente por cimento Portland (CP), mas um dos problemas é a sua alta temperatura de fabricação, que gera poluentes. O uso de agregados triturados originados da demolição do concreto é aproveitável para a elaboração de Concreto Reciclado, um material que pode diminuir custos, diminuir a contaminação e tornar a edificação mais econômica. Porém, a elaboração de concreto reciclado enfrenta a busca por traços otimizados para se alcançar um maior desempenho mecânico sob solicitações estáticas e dinâmicas. Este artigo faz uma revisão dos avanços internacionais sobre este assunto.

Palavras Chave: Concreto reciclado, Resíduos sólidos, Cimento Portland, Agregados.

ABSTRACT

The generation of solid residues of hydraulic concrete, also considered waste, is turning into an environmental problem. The construction material primarily manufactured is Portland cement, but one of the main problems is its high manufacturing temperature which generates pollutants. The use of grinded aggregates that come from the demolition of hydraulic concrete is used to generate recycled hydraulic concrete, a material that could lessen costs, decrease pollution and cheapen construction. Nevertheless, the elaboration of recycled concrete faces the search for optimal designs in order to achieve the highest mechanical performance under static and dynamic requests. This work reviews international advancements in this field.

Keywords: Recycling concrete, Solid residues, Portland cement, Aggregates.

RESUMEN

La generación de residuos sólidos de concreto hidráulico, considerados como desecho, está convirtiéndose en un problema medioambiental. El material de construcción mayormente fabricado es el cemento Portland (CP), pero un problema es su alta temperatura de fabricación, que genera contaminantes. El uso de agregados triturados provenientes de demolición de concreto hidráulico se aprovecha para generar Concreto Hidráulico Reciclado, un material que puede abatir costos, disminuir la contaminación y abaratar la edificación. Sin embargo, la elaboración de concreto reciclado se enfrenta a la búsqueda de diseños óptimos para lograr el mayor desempeño mecánico bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. En este trabajo se hace una revisión de los avances internacionales en esta temática.

Palabras Clave: Concreto reciclado, Residuos sólidos, Cemento Portland, Agregados

Autor de correspondencia: Elia Mercedes Alonso Guzmán

1. INTRODUCCIÓN

Entre otras muchas áreas del conocimiento, la preservación del medio ambiente es una parte de la ingeniería civil que se puede resolver desde el concreto reciclado, pues su uso: minimiza la descarga de residuos sólidos que contaminan el medio ambiente, re-usa materiales considerados como desecho que no tienen un costo importante propiamente dicho, innova en diseño de materiales para lograr el máximo desempeño mecánico bajo sollicitaciones estáticas y dinámicas que permitan mejorar la situación de vida de quienes emplean las edificaciones construidas con estos materiales; preserva el medio ambiente por evitar contaminación con residuos sólidos, disminuye las emisiones de CO_x al aire que todos respiramos y evita extracciones innecesarias de las canteras de materiales geológicos conservando la arquitectura del paisaje, y la flora y fauna endémicas.

Cada profesión desde su particular dominio del conocimiento tiene la obligación y responsabilidad moral de contribuir en lo posible en el mejoramiento y preservación del medio ambiente; por lo que el concreto reciclado es un tema de investigación primordial para evitar en lo posible el calentamiento global. Se investiga su diseño, elaboración, durabilidad, desempeño, economía, viabilidad.

El empleo de los materiales de construcción reciclados data de la posguerra en los años 40's del siglo XX, pues Europa tenía grandes cantidades de escombros producto de los bombardeos, que comenzaron a usarse como canteras para reconstruir, con buenos resultados. Los países más devastados fueron el Reino Unido y Alemania, las publicaciones de la época, mayormente británicas, alemanas y rusas dan cuenta del uso de escombros para construcción de nuevas obras civiles, sólo que mucho de los escombros eran material cerámico (ladrillos, cerámicas de mobiliario de servicios sanitarios), material pétreo natural, plásticos y gomas (Hoffmann et al, 2012, Kulakowski et al, 2012) y concreto hidráulico; que posteriormente tuvieron adiciones como escorias, cenizas, humo de sílice (González-Fonteboa et al, 2009). El concreto hidráulico llegó a América a fines del siglo XIX (Torres et al, 2014), y los EEUU iniciaron también sus estudios en reciclado. El primer informe de concreto reciclado fue realizado en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, por Gluzhge, P. en 1946, poco tiempo después de la 2a Guerra Mundial.

Los primeros estudios realizados en EEUU, pero posteriores al estudio de Gluzhge, recomiendan en primera instancia emplear concreto hidráulico reciclado de origen de infraestructura vial o pavimento rígido, y sólo en segundo lugar el concreto reciclado proveniente de edificación como viviendas, pues mencionan que puede estar contaminado con productos de azufre, dado que para recubrimientos se usa yeso (sulfato de calcio anhidro o hemihidratado), y entonces podría provocarse ataque por sulfatos al nuevo concreto y este tipo de ataque daña al acero de refuerzo embebido en el concreto hidráulico. El concreto hidráulico reciclado se empleaba mayormente en mezclas de asfalto para pavimentos substituyendo a los agregados pétreos cuyo problema era la falta de afinidad eléctrica con los materiales asfálticos (Harek et al, 1971; Buck, A., 1972). Durante un largo periodo de tiempo se tuvo la idea de que los materiales pétreos naturales ácidos (base sílice: ignimbritas, dacitas, andesitas, plagioclasas, ortoclasas, cuarzo, critobalita, tridimita, etc.) presentaban cargas eléctricas superficiales negativas, mientras que los materiales pétreos básicos o alcalinos (los ferromagnesianos: basaltos) tenían cargas eléctricas superficiales positivas. En trabajos de investigación recientes ha quedado de manifiesto que todos los agregados pétreos naturales (volcánicos y triturados: areniscas, granitos, mármoles, dacitas, andesitas, riolitas, calizas, dolomitas, cuarzo, basaltos) tienen cargas eléctricas negativas (Rodríguez Talavera et al, 2001).

Lo anterior pensando en hacer mezclas asfálticas con emulsiones aniónicas o catiónicas, donde es de capital importancia saber si habrá afinidad. También se ha elaborado concreto reciclado con residuos de neumáticos como en los pavimentos asfálticos (Kardos et al, 2015) La intensidad de la carga de la superficie del agregado, en combinación con la intensidad de la carga del agente emulsivo, puede influir marcadamente en la velocidad de rotura, en particular en el caso de emulsiones catiónicas. Iones de calcio y de magnesio presentes en la superficie del agregado pueden reaccionar con -y desestabilizar a – ciertos emulsivos aniónicos, acelerando la rotura de la emulsión (Carrasco, 2004). Este problema de la afinidad eléctrica superficial no ocurre en los casos de concretos hidráulicos reciclados con matrices cerámicas.

2. ANTECEDENTES

Lograr que materiales considerados como desechos sólidos (basura, residuos), como el caso del concreto demolido o colapsado, se re-usen para elaborar nuevas mezclas de concreto, resuelve entre otros objetivos: A) re-uso de residuos sólidos, abatiendo la cantidad de residuos o desechos que dañan al medioambiente y por ende a los humanos, por ejemplo problemas de lixiviados; B) diseño, innovación y elaboración de nuevos materiales de construcción ecoamigables; C) conservación de los minerales naturales de las canteras, que redundan en no ataque, no explotación y preservación al hábitat natural de flora y fauna nativa, conservación de la arquitectura del paisaje, geoparques. Los recursos minerales son no renovables; D) disminución de la contaminación atmosférica, al darle un nuevo uso a un material que para su producción emitió CO y CO₂. La producción de agregados pétreos volcánicos, como los regionales en Michoacán, México, al tratarse de rocas ígneas extrusivas implica que son producto de eventos volcánicos y las eyecciones magmáticas son fuente de emisiones de azufre oxidado, SO_x. La actividad volcánica constituye una fuente importante de emisiones de SO_x a la atmósfera, siendo la principal fuente de azufre a la estratósfera Amigo Ramos, 2000; López et al, 2015; Ruggieri, 2012). Los Compuestos CO y CO₂ son materiales que por fotosíntesis pueden convertirse en O₂, sin embargo no hay un proceso que absorba compuestos de azufre produciendo oxígeno.

La fabricación de CP produce aproximadamente el mismo peso en compuestos de carbono vertidos a la atmósfera, como CO y CO₂, entonces el reciclado de concreto también reduce la huella de carbono en la atmósfera. América Latina, no se distingue por su gran contribución a la contaminación global.

En México el 2002, la principal fuente de gases de efecto invernadero en México fue el sector energía, responsable de cerca de 70% de las emisiones. Otros procesos industriales, como la producción del cemento, vidrio, acero, papel, alimentos y bebidas, entre otros, contribuyeron con alrededor de 9% de las emisiones totales de GEI del país (Cambio Climático, 2009). El 40% del dióxido de carbono producido por una familia regular proviene de los vehículos automotores que circulan con combustibles fósiles y de la construcción de viviendas (<https://www.veoverde.com/2014/01/llegaron-las-viviendas-sustentables-a-mexico/>).

El concreto es uno de los materiales más ampliamente producido y utilizado en el mundo, en la construcción de obras civiles y también militares, pero también es un generador de grandes volúmenes de residuos sólidos asociados a los procesos de demolición y desperdicio (Valdés et al 2011). Para aminorar el cambio climático y la contaminación ambiental, se trabajó en la firma del Protocolo de Kyoto, que fué negociado en 1997 y puesto en vigor en 2005. El protocolo pretendía que 37 países desarrollados redujeran sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 5 por ciento para el año 2012, con respecto a sus niveles de emisiones de 1990. México al no ser un país considerado como desarrollado, no lo signó.

El protocolo ha propiciado que los países desarrollados al menos inicien políticas cuyo enfoque es la disminución de estos volúmenes de contaminantes vertidos a la atmósfera, que es además patrimonio de todos (Alonso et al 2007) mediante su reutilización, disminución o buscándoles otra alternativa de reciclado (Debieb y Kenai, 2008; Rolón et al, 2007; G. Valdés et al, 2009).

Estudios realizados en la Unión Europea (Etxeberria et al 2007; Vázquez, E. et al, 2004; http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf; Jianzhuang et al, 2012; <http://www.concretosreciclados.com.mx/>; <http://www.veoverde.com/2013/11/concretos-reciclados-otra-apuesta-mexicana-por-el-ambiente/>) han podido establecer que la producción de residuos de la construcción asciende a aproximadamente 900 millones de toneladas/año, como aparece en el resumen de la Tabla 1. Investigaciones en España, Alemania, Francia e Inglaterra, países que carecen de abundancia en canteras de agregados pétreos minerales naturales, han podido determinar la viabilidad de reutilizar concreto hidráulico procedente de la construcción como material granular, máxime si existe la carencia de los mismos. Buscar que requieran de poco combustible fósil para su fabricación, transporte y reciclado, lo que disminuya la energía necesaria para su re-uso.

Se observa que respecto a la cantidad de reciclado per cápita, se distingue Australia con la mayor cantidad, 25.78 Ton/habitante. Respecto a la cantidad de concreto reciclado en función al territorio del País en cuestión, de forma teórica, a mayor territorio correspondería mayor construcción de obra civil y por tanto mayores residuos, sin embargo se distingue Taiwán, con 1862.15 Toneladas por km² de territorio, siendo el mayor índice del resumen. Tampoco puede perderse de vista que muchos países aún no tienen un registro fidedigno.

Se ha hablado de los sismos que han asolado a países como Turquía, Afganistán, Nepal, pero no hay registros en la literatura indizada de las cantidades que se usan de concreto para reciclado, sin olvidar tampoco que en estos países se continúa con la fuerte tradición de muros de cerámica y/o adobe, con mayores módulos de elasticidad para absorción de energía dinámicas.

La Producción Mundial de concreto hidráulico se estima en 25 mil millones de toneladas anuales. A causa de la contaminación ambiental y el cambio climático, cobra importancia iniciar la creación de conciencia colectiva en los países menos desarrollados a fin de reducir la extracción de materiales pétreos de los entornos naturales, disminuyendo así un agotamiento acelerado de las reservas de áridos provenientes tanto de los cauces de los ríos como de las canteras (Rakshvir and Barai, 2006; Montoya et al 2005). La demanda de recursos naturales y la escasez de materias primas es importante; por ello, la necesidad de preservar y proteger el medio ambiente de un desequilibrio ecológico, hace que la técnica del concreto reciclado (Oikonomou, 2005), sea una actividad de gran importancia en la construcción (Aguilar et al 2005).

Investigaciones previas han demostrado que las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico reciclado, constituido por adiciones de árido reciclado en su matriz, pueden garantizar su resistencia y desempeño mecánico (Topcu, 1997; Topcu & Sengel, 2004; Topcu & Guncan, 1995). Estudios derivados de aplicaciones concretas en obras civiles, muestran que muchas veces el residuo del concreto no es suficiente ni eficientemente empleado. Este residuo de concreto también puede emplearse para producir elementos prefabricados de concreto, como bloques, materiales aislantes, materiales aligerados, paneles.

Para un reciclado exitoso, deben considerarse diversas variables en el diseño de las nuevas mezclas de concreto: porcentaje de material reciclado, porcentaje de gruesos reciclados, de material fino, relación agua/cemento, densidad del material reciclado, empleo de fluidificantes, revenimiento (trabajabilidad), resistencia mecánica, homogeneidad (Chang et al, 2011). El estudio de la microestructura del concreto reciclado presenta nuevos retos pues la zona interfacial (ITZ) tiene 2 zonas difíciles de identificar en función de la edad/hidratación (Kong et al, 2010; Li et al, 2012):

concreto fraguado antiguo y moderno, con diferentes composiciones, porosidades, densidades, antigüedades, resistividades, hidrataciones y durezas.

Tabla 1. Resumen de concreto reciclado. 1. Millones de Toneladas de concreto reciclado (CSI Recycling Concrete Full Report 2007); 2. Territorio del país en km²; 3. Habitantes en millones; 4. Relación de Concreto Reciclado en millones de toneladas por cápita y 5. Relación de Toneladas de concreto reciclado producidas por km² de territorio.

País	1	2	3	4	5
Alemania	120.00	357,121	80	1.5	336.02
Argentina	5.50	2 780 400	43	0.13	1.99
Australia	550.00	7,692,024	21.5	25.58	71.50
Austria	22.00	83,371	8.3	2.65	266.88
Bélgica	14.00	30,510	10.4	1.36	458.87
Brasil	50.00	8,500,000	200	0.25	5.88
China	200.00	9,600,000	1,300	0.15	20.83
Colombia	13.00	1,141,748	47.4	0.27	11.38
Costa Rica	0.50	51,100	5	0.10	9.78
Dinamarca	5.00	43,098	5.6	0.89	116.01
Estados Unidos	335.00	9,826,675	316	1.06	34.09
España	39.00	504,645	47.1	0.83	77.28
Finlandia	1.60	337,030	5.4	0.3	4.74
Francia	25.00	675,417	66	0.38	37.01
Holanda	26.00	41,526	16.8	1.55	626.11
Irlanda	17.00	84,421	6.2	2.74	201.37
Israel	7.50	22 145	8.6	0.87	3.39
Italia	40.00	301,338	59.4	0.67	132.74
Japón	77.00	377,835	126.7	0.61	203.79
Luxemburgo	2.70	2,586	0.54	5	1044.08
México	30.00	1,964,375	119	0.25	15.27
Portugal	4.00	92,391	10.6	0.38	43.29
Reino Unido	70.00	243,610	63.2	1.11	287.34
República Checa	9.00	78,866	10.5	0.86	114.12
Suiza	7.00	41,290	7.9	0.89	169.53
Suecia	1.20	449,964	9.6	0.13	2.67
Taiwán	67.00	35,980	23.1	2.9	1862.15
Tailandia	10.00	513,115	65.5	0.15	19.49
Mundial	900.00	150,386,640	7000	0.13	5.98

El método de disminución del tamaño del concreto hidráulico endurecido para obtener gravas, puede producir pérdidas por pulverización, tamaños casi como áridos $\leq \frac{1}{4}$ pulgada (6.4 mm), zonas

porosas con sus correspondientes formas, tamaños y distribución de los poros en las matrices, que incrementan el área superficial aumentando la demanda de CP en la nueva mezcla (Kou et al, 2011, Gómez-Soberon, 2012); morfología indeseable de las partículas trituradas donde las dimensiones respecto a los ejes X, Y y Z sean muy diferentes entre sí, produciendo formas alargadas o semiaciculares (Eguchi et al, 2007). Para evitar que los áridos en el concreto reciclado presenten problemas como los descritos, el producto de la trituración fino y grueso debe caracterizarse para realizar diseños de concreto óptimos; algunos países ya tienen un código para pétreos reciclados (Martín-Morales et al, 2011). Otro parámetro a considerar es el porcentaje de pétreos naturales que puede sustituirse por material reciclado (Etxeberria et al, 2007), el consumo de cemento por m³ de concreto hidráulico y la resistencia mecánica son funciones de estos porcentajes (Marie and Quiasrawi, 2012), algunas mezclas sólo substituyen los agregados gruesos por material reciclado, otras sólo substituyen los agregados finos por material reciclado (Evangelista y Brito, 2007; Raoa et al, 2007), la calidad y propiedades de los agregados dependen de la roca madre o concreto de dónde provienen, mientras mayor sea la resistencia del concreto primario, mayor será también la resistencia de los agregados reciclados provenientes del concreto original (Kou et al, 2012) pero también existe la posibilidad de que los concretos primarios tengan orígenes distintos; otros diseños de mezclas emplean ambos tipos de agregado reciclado, algunos autores trabajan con porcentajes específicos de cada agregado (Mas et al 2012). Las variaciones se diseñan y elaboran en función de las propiedades mecánicas de diseño que se buscan en el concreto reciclado (Padmini et al 2009; Tabsh y Abdelfatah, 2009).

El consumo de CP depende del método de diseño, el factor de seguridad, el tipo de material, el coeficiente sísmico, la calidad del suelo, el uso de la construcción. No existen métodos de diseño universalmente reconocidos para diseñar morteros o concretos con áridos provenientes de concreto reciclado, pero se han elaborado morteros con material de reciclado de manera exitosa (Abbas et al, 2009).

El diseño de mezclas de concreto inició a fines del siglo XIX y principio del siglo XX con el Dr. Duffus Abrams (Abrams, 1918). Hasta fines del siglo XX el concreto hidráulico se diseñaba primordialmente basado en la resistencia mecánica a compresión, que es la propiedad índice del concreto, sin embargo desde el inicio del siglo XXI cambió la orientación y ahora debido al desempeño del concreto, a la vida útil, a la necesidad de disminución en el mantenimiento, el diseño de mezclas de concreto contempla también los criterios de durabilidad (Kwan et al 2012; López Celis et al, 2006) identificando la resistividad y la velocidad de pulso ultrasónico como parámetros a cuantificar.

Las mezclas de concreto con material reciclado se evalúan desde los puntos de vista de desempeño mecánico, desempeño físico, durabilidad (Casuccio et al, 2008), formas de falla (Liu et al 2011), fluidez, trabajabilidad y revenimiento (Guneyisi, 2010), edad e hidratación del cemento (Katz, 2003), grado de compactación del concreto, que puede lograrse con métodos vibratorios o con cementos especiales autocompactantes (Kou et al 2009).

El desempeño mecánico usualmente se evalúa con pruebas destructivas de esfuerzo de ruptura a compresión simple (Xiaoa et al, 2005) si existen especímenes cúbicos o cilíndricos, pero si sólo existen esquirlas de dimensiones aproximadas máximas de 10.0 cm se puede emplear el método del Point Load para esas muestras sin labrar, tensión simple y tensión indirecta, flexión o módulo de ruptura. El módulo de ruptura es el valor índice para el caso de diseño de pavimentos rígidos (Lye et al, 2016). La evaluación del concreto reciclado también se realiza con el empleo de métodos de prueba no destructivos que no requieren de preparación del material, pueden repetirse y no provocan daño del mismo; las pruebas de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico son las más empleadas (Park et al, 2005). Para mejorar el desempeño de las mezclas de concreto hidráulico se recurre a diseños de mezclas con factores de seguridad, disminución de las relaciones

A/C; curado prolongado por inmersión o por aspersión (Fonseca et al, 2011). Otra manera de incidir en la modificación de las propiedades de los concretos reciclados es el empleo de aditivos y adiciones o sustituciones de cemento por materiales con actividad puzolánica. Se pueden elaborar concretos activados alcalinamente con agregados producto del reciclado del concreto hidráulico (Kathirvel et al, 2016)

3. ACTUALIDAD

El problema más acucioso actualmente es el relativo a las emisiones de efecto invernadero y la posibilidad y acciones realizadas para disminuirlas.

Por muchos caminos se está trabajando en propuestas que concurran en la reducción de emisiones y de residuos a la atmósfera.

El desempeño de la fabricación de concreto empleando pétreos (rocas) producto del reciclado del concreto ha sido en lo general suficiente para producir un nuevo material cuyo desempeño mecánico y durabilidad cumpla con los estándares internacionales. Quizá su desventaja principal pudiera considerarse la porosidad de los agregados gruesos y finos producidos por la trituración, lo que ha podido resolverse tomando en consideración para el diseño de nuevas mezclas: 1°- La disminución de la relación agua/cemento que favorecerá la durabilidad y la obtención de la resistencia mecánica suficiente, pero su resolución se hace empleando fluidificantes o superfluidificantes o reductores de agua (aditivos indicados en ASTM C-494) que permitan obtener mezclas trabajables y fluidas. 2°- El empleo de residuos agroindustriales que presenten acusada actividad puzolánica, ricos en silicoaluminatos, que “llenen” los huecos de la pasta endurecida (recristalicen en los poros densificando la matriz), los oxalatos de calcio como la weddellite y la wewellita han demostrado que realizan la misma función como adiciones al concreto (Torres et al, 2010; Torres et al, 2010 bis; Del Valle et al, 2015). El concreto sigue hidratándose y endureciendo a lo largo de la línea del tiempo, incluso contenedores de concreto reciclado provenientes de concreto demolido en 2011 y construido en los 60's que permanecieron a la intemperie durante el periodo de lluvias, formaron nuevas ligas entre ellos, solidificándose y haciéndose difícil romperlos con las manos. El uso de residuos con actividad puzolánica resuelve también de forma indirecta la acumulación de otros residuos sólidos que contaminan y ocupan espacios, el empleo de adiciones ricas en silicoaluminatos que incrementan el desempeño mecánico de las nuevas mezclas, mezclas que incrementan la protección del acero de refuerzo embebido en ellas al densificarse, disminuyendo el ataque por carbonatación en concretos y por consiguiente la corrosión en los aceros, otras maneras de evitar la corrosión en el acero de refuerzo de los concretos es el uso de acero inoxidable, que económicamente parece poco costoso pero que reduce con creces los gastos de mantenimiento aumentando la durabilidad (Pérez Quiroz et al 2014). Los resultados de las propiedades físicas y mecánicas obtenidos de las adiciones, sustituciones y aditivos empleados en nuevas mezclas de concreto hidráulico y mortero bases cemento y cal, en estados fresco y endurecido, muestran la veracidad de estas afirmaciones (Martínez et al, 2015; Bernabé, 2015 y 2012; Jacobo, 2014; Guzmán, 2014; Villicaña, 2014; Arreola, 2013; Zalapa, 2013; Contreras, 2013; Figueroa, 2013; Campos, 2013; Flores, 2013; Arguello, 2012; Gómez Zamorano et al, 2004; Moreno et al, 2004); y 3°- La adición de productos químicos puzolánicos de grado pureza industrial que puedan activarse a temperaturas amigables, los materiales geopoliméricos (Rubio et al, Patente 2014; Rojas, 2013; Medina, 2011) o materiales alcalinamente activados.

Actualmente se experimenta con múltiples residuos sólidos como agregados, que pueden tener orígenes orgánicos como fibras, cáscaras y semillas; adiciones que son residuos de otros procesos industriales como la ceniza de bagazo de caña, ceniza de carbón mineral, cenizas de elaboración

de materiales cerámicos artesanales hechos de arcillas, escorias de producción metalúrgica y siderúrgica.

4. DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se observa que Australia es el país que recicla el mayor número de toneladas por cápita, mientras que Taiwán es el país que en función de su territorio recicla más toneladas de concreto, en la misma tabla que contiene los datos de 28 países, México ocupa el lugar 11, lo que indica que estamos lejos de usar todo nuestro concreto demolido, pero el esfuerzo es importante y sostenido, y compartido por la comunidad.

El uso del concreto reciclado es más común en Europa, quizá por la falta de agregados minerales naturales. En América Latina, específicamente en México, caso que conocemos un poco más, se está buscando el empleo sostenido de materiales considerados como desechos sólidos que permitan respuestas a la conservación del medio ambiente, a la búsqueda e innovación de adiciones, métodos, técnicas y procesos que mejoren las propiedades mecánicas del concreto reciclado.

Otro punto a mencionar es el sostenido y continuo trabajo realizado en las nuevas tendencias de diseño de concreto hidráulico por índices de durabilidad, para alargar la vida útil de las estructuras de concreto, conduciendo a disminuir en lo posible la demolición de concreto hidráulico.

El re-uso de residuos sólidos ha conducido también a encontrar propiedades de los mismos que les han permitido adicionarse a las mezclas de concreto/mortero, modificando algunas de sus propiedades en favor de la durabilidad.

5. REFLEXIONES

Usar material reciclado evita que haya acumulaciones de concreto colapsado o demolido que necesite ser removido o transportado a vertederos de residuos sólidos, con el consiguiente gasto de combustible para el traslado. Las acumulaciones de estos residuos sólidos también han provocado cambios en la arquitectura del paisaje al modificar la morfología de la superficie o topografía de las zonas de recepción de material demolido.

El uso de agregados producto del reciclado permite disminuir la cantidad de emisiones contaminantes al medio ambiente.

El material reciclado permite que no se sobreexploten innecesariamente las canteras, conservando en lo posible la arquitectura del paisaje y fomentando el turismo geológico especializado que conlleva la preservación de la biota endémica, disminuyendo el impacto ambiental de las extracciones y los modos de falla por deslizamiento de los bancos de material cercanos a los centros poblacionales, así como las recargas a los mantos acuíferos.

6. CONCLUSIONES

Reciclar concreto resuelve la falta de agregados pétreos y la protección de sus canteras, también resuelve si los agregados no cumplen con la normativa vigente, como el caso de las espumas volcánicas o pumicitas. El uso de agregados provenientes de concreto reciclado permite también que éstos se coloquen saturados en la mezclas y así se inicie el curado interno de las mezclas nuevas de concreto reciclado.

El agregado pétreo obtenido como resultado de la demolición del concreto podría no tener las condiciones ideales, pero también existe la realidad de que muchos agregados pétreos naturales

minerales existentes localmente no cumplen con todas y cada una de las recomendaciones existentes en los Reglamentos de Construcción vigentes, y los constructores, ingenieros y arquitectos, buscan la manera de sacarles el mayor provecho posible logrando desempeños mecánicos importantes.

El agregado de origen reciclado tiene aún mucho por estudiar pero sí es posible obtener desempeños de 350 MPa en concretos reciclados si se dosifica el pétreo, se reducen las relaciones A/C, se adicionan aditivos que modifiquen la reología de las mezclas frescas para su colocación y que simultáneamente permitan alcanzar la resistencia.

Simultáneamente al diseño y elaboración del concreto reciclado deben explorarse posibilidades de adiciones de otros materiales que modifiquen las propiedades de los concretos así elaborados consiguiendo condiciones exitosas y económicas.

En aras de evitar las emisiones de carbono, frenar la construcción, equivaldría no incrementar la infraestructura y comodidad de los habitantes de un país, pero no hacer nada nos vuelve cómplices de alguna manera, y es por esto que se buscan alternativas para la producción de materiales de construcción que sean el resultado del empleo de materiales que se han convertido en desechos, residuos y basuras industriales, y nos compromete a seguir buscando alternativas de modificación de las propiedades de los nuevos materiales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; del programa de Redes Temáticas del Programa de Mejoramiento del Profesorado, Promep, de la Secretaría de Educación Pública, SEP con el Proyecto de titulado: Red Temática Promep para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico. También se agradece por las becas estudiantiles de las Fundaciones Exxon Mobile, Telmex, ICA y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Conacyt.

8. REFERENCIAS

- Abbas, A., G. Fathifazl, O. Burkan Isgor, A. Ghani Razaqpur, B. Fournier, S. Foo, 2009, *Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method*, Cement & Concrete Composites 31, 555–563
- Abrams, D., 1918, *The Design of Concrete Mixtures. First edition*, Lewis Institute, USA, pp 15-29
- Aguilar, C., M.P. Muñoz, O. Loyola, 2005, “Uso de hormigón reciclado para la fabricación de hormigones”, Revista Ingeniería de Construcción, 20 (1), 35-44
- Alonso, E., W. Martínez, J. C. Rubio, F. Velasco, H. L. Chávez, M. Ávalos, C. Lara y E. Cervantes, 2007, “Calidad del Aire en cuatro ciudades de Michoacán, México: su efecto sobre materiales de construcción”, Revista de la Construcción, ISBN 0717-7925, Revista 11, 6 (2), 66-74
- Amigo Ramos, A., 2000, Volcán Láscar: Aporte y dispersión de azufre oxidado a la atmósfera regional, Informe Final GL69F, Departamento de Geología Universidad de Chile, Chile, 3
- Arguello Hernández, S. C., 2012, “Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con substituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus”, Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Arreola Sánchez, M., 2013 “ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CENIZAS ORGÁNICAS (SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DEL

CONCRETO EN PUENTES” Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Bernabé Reyes C., 2012, “*Adiciones minerales de alta temperatura a morteros de cemento como modificadores de comportamiento físico-mecánico*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Bernabé Reyes C., 2015, “*EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN*”, Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Buck, A. D., 1972, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, RECYCLED CONCRETE C-72-14, 35p

Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones Serie ¿Y el medio ambiente?, 2009, Semarnat, México

Campos Núñez J. J., 2013, “*Evaluación de propiedades físico-mecánicas de un concreto con aditivo fluidificante, así como la disminución del consumo del cemento en su elaboración*” Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Carrasco Flores D. O., 2004, “*Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias*”, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Piura, Perú, pp 44

Casuccio, M., M. C. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, 2008, Failure mechanism of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 22, 1500–1506

Chang, C.Y., R. Huang, P.C. Lee, T. L. Weng, 2011, *Application of a weighted Grey-Taguchi method for optimizing recycled aggregate concrete mixtures*, *Cement & Concrete Composites* 33, 1038–1049

Contreras Marín, E., 2013, “*Comportamiento de un concreto ecológico, elaborado con agregados producto de la demolición y baja relación agua/cemento*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Cruz Jiménez L., 2012, “*Comportamiento mecánico del carbón mineral y de la escoria de alto horno en morteros como sustituto parcial del cemento*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

CSI Recycling Concrete Full Report, 2008, The Cement Sustainability Initiative, World Business Council for Sustainable Development, Iniciativa por la sostenibilidad del cemento, 2008, Reciclando concreto, Consejo Mundial Empresarial para el desarrollo sustentable, WBCSD, Suiza, www.wbcd.org y www.wbcdcement.org 12-13

Debieb, F., and S. Kenai, 2008, “*The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*”. *Construction and Building Materials*, 22, 886-893

Del Valle Moreno A., Guzmán Torres J. A., Alonso Guzmán E. M., Martínez Molina W., Torres Acosta A. A., Terán Guillén J., Montes Zea M. A., Torres Murillo A. I., Martínez Madrid M., 2015, *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adicionados con fibras deshidratadas de cactus opuntia*, Publicación Técnica 448 del Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297

Eguchi, K., K. Teranishi, A. Nakagome, H. Kishimoto, K. Shinozaki, M. Narikawa, 2007, *Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction*, *Construction and Building Materials* 21, 1542–1551

Etzeberria, M., E. Vázquez, A. Marí, & M. Barra, 2007, “*Influence of amount of recycled coarse aggregates and production on properties of recycled aggregate concrete*”, *Cement and Concrete Research*, 37, 735–742

- Evangelista, L., J. de Brito, 2007, *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*, Cement & Concrete Composites 29, 397–401
- Figueroa Carranza R. A. 2013, “*Elaboración de concreto sustentable con adición mineral de alta temperatura como modificador del comportamiento físico-mecánico*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Flores Lica O. R., 2013, “*Análisis Físico Mecánico de morteros de cemento adicionando metacaolín y poliestireo*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Fonseca, N., J. de Brito, L. Evangelista, 2011, *The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste*, Cement & Concrete Composites 33, 637–643
- Gluzhge, P., 1946, “*The Work of Scientific Research Institutes*” *Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo*, No. 4, pp 27-28, USSR. A brief English summary of this work is in *Engineer's Digest*, 7 (10), 330
- Gomez-Soberon, J. M. V., 2002, *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study*, Cement and Concrete Research 32, 1301– 1311
- Gómez Zamorano L. Y., J. I. Escalante García J. I, G. Mendoza Suárez, 2004, “*Geothermal waste: An alternative replacement material of Portland cement*”, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 39, 4021 – 4025
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella F., Martínez-Lage I., Eiras-López J., 2009, *Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume*, *Construction and Building Materials* 23, 3406–3410
- Guneyisi, E., 2010, *Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash*, *Materials and Structures*, 43, 1037–1048
- Guzmán Torres J. A., 2014, “*Concreto de alta durabilidad y alto desempeño en infraestructura*”, Tesis de Maestría, Fac. Ing. Civil Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Harek, C. R., Gallaway, B. M., and Long, R. E., 1971, “*Look at Processed Rubble - It's a Valuable Source of Aggregates*”, *Roads and Streets*, 114 (9), 82-85
- Hoffmann, C., S. Schubert, A. Leemann, M. Motavalli, 2012, *Review Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material*, *Construction and Building Materials* 35, 701–709
- <http://www.concretosrecicladados.com.mx/> consulta 17 ene 2014
- http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf, consulta 17 ene 2014
- <http://www.veoverde.com/2013/11/concretos-recicladados-otra-apuesta-mexicana-por-el-ambiente/> consulta 17 ene 2014
- <https://www.veoverde.com/2014/01/llegaron-las-viviendas-sustentables-a-mexico/>
- Jacobo Jacobo, S., 2014, “*Evaluación Físico Mecánica de Concreto Hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Jianzhuang, X., W. Li, Y. Fan, X. Huang, 2012, *An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)*, *Construction and Building Materials* 31, 364–383
- Kardos A. J., S. A. Durham, 2015, *Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications*, *Construction and Building Materials* 98, 832–845
- Kathirvel P., Saravana Raja Mohan Kaliyaperumal, 2016, *Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete*, *Construction and Building Materials*, 102, 51–58

- Katz, A., 2003, *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*, Cement and Concrete Research 33, 703–711
- Kong, D., T. Lei, J. Zheng, C. Maa, J. Jiang, J. Jiang, 2010, *Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials 24, 701–708
- Kou, S.C., C. S. Poon, 2009, *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates*, Cement & Concrete Composites 31, 622–627
- Kou, S. C., C. S. Poon, M. Etxeberria, 2011, *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete*, Cement & Concrete Composites 33, 286–291
- Kou, S. C., C. S. Poon, H. W. Wan, 2012, *Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates*, Construction and Building Materials 36, 881–889
- Kulakowski, M.; Guerrero, M.; Barrera, J.; Gonzáles, M., 2012, “*Viabilidad de utilización de aditivo estabilizador de hidratación (AEH) para el reciclaje del hormigón en estado fresco – Estudio de caso en el sur de Brasil*” en Revista de la Construcción, 11 (3), 99-111.
- Kwan, W. H., M. Ramli, K. J. Kam, M. Z. Sulieman, 2012, *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*, Construction and Building Materials 26, 565–573
- Lara Gómez C., J. F. Mendoza Sánchez, M. G. López Domínguez, R. Téllez Gutiérrez, W. Martínez Molina, E. M. Alonso Guzmán, “*Propuesta Metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Michoacana*”, Publicación Técnica 322 del Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297
- Li, W., J. Xiao, Z. Sun, S. Kawashima, S. P. Shah, 2012, *Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches*, Construction and Building Materials 35, 1045–1055
- Liu, Q., J. Xiao, Z. Sun, 2011, *Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete*, Cement and Concrete Research 41, 1050–1057
- López Celis R., J. T. Pérez Quiroz, A. A. Torres Acosta, M. Martínez Madrid, W. Martínez Molina, L. E. Ariza Aguilar, E. Zamudio Cíntora, J. Genescá Llongueras, B. Valdez Salas, 2006, *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Publicación Técnica 292 del Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297
- Lopez T., H. E. Thomas, A. J. Pratac, A. Amigo, D. Feea, D. Moriano, 2015, “*Volcanic plume characteristics determined using an infrared imaging camera*”, Journal of Volcanology and Geothermal Research 300, 148–166
- Lye C. Q., Ravindra K. Dhir, Gurmel S. Ghataora, Hui Li, 2016, *Creep strain of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 102, 244–259
- Marie, I., H. Quisrawi, 2012, *Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates*, Journal of Cleaner Production 37, 243-248
- Martín-Morales, M., M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano, I. Valverde-Espinosa, 2011, *Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08*, Construction and Building Materials 25, 742–748
- Martinez-Molina Wilfrido, Torres-Acosta Andres, Martínez Pena G. E. Itandehui, Alonso-Guzman Elia, Mendoza-Perez Itzel, 2015, “*CEMENT-BASED MATERIALS ENHANCED DURABILITY FROM OPUNTIA FICUS INDICA (OFI) MUCILAGE ADDITIONS*”, ACI Materials Journal, 112 (1), 165-172, DOI: 10.14359/51687225

- Mas, B., A. Cladera, T. del Olmo, F. Pitarch, 2012, *Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use*, Construction and Building Materials 27, 612–622
- Medina Olvera, S., 2011, “*DISEÑO, ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD DEL CONCRETO UTILIZADO EN LAS VÍAS TERRESTRES, SOMETIDO A INTEMPERISMO ACELERADO*”, Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Montoya, H, C. Pino y G. Valdéz, 2005, “*Reutilización de residuos del hormigón*”, Revista BIT, 12 (41), 44-47
- Oikonomou, N. D., 2005, *Recycled concrete aggregates*, Cement & Concrete Composites 27, 315–318
- Moreno E., R. Solís, L. Aportela y Pardo, 2004, “*Caracterización de la ceniza del volcán Popocatepetl y su aplicación como material cementante en su estado natural*”, Revista Ingeniería de la Construcción, 19 (3), 127-134
- Padmini, A.K., K. Ramamurthy, M. S. Mathews, 2009, *Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials 23, 829–836
- Park T, S. B., D. S. Seo, J. Lee, 2005, *Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio*, Cement and Concrete Research 35, 1846– 1854
- Pérez Quiroz J. T., Terán Guillén J., Alonso Guzmán E. M., Martínez Molina W., Rendón Belmonte M., Torres Acosta A. A., Martínez Madrid M., 2014, *DETERMINACIÓN DE LA SOLDABILIDAD ENTRE UN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO Y UN ACERO AL CARBONO PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES*, Publicación Técnica 395 del Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297
- Torres Acosta A. A., C. E. Celis Martínez, W. Martínez Molina y M. G. Lomelí González, 2010, *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas*, Publicación Técnica No. 326 del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297
- Torres Acosta A. A., W. Martínez Molina, M. G. Lomelí González, A. Pérez Gallardo, 2010 bis, *Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto*, Publicación Técnica No. 328 del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, ISSN 0188-7297
- Rakshvir, M. and S. Barai, 2006, “*Studies on recycled aggregates-based concrete*”, Waste Management and Research, 24, 225-233
- Raoa, A., K. N. Jha, S. Misra, 2007, *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*, Resources, Conservation and Recycling 50, 71–81
- Rodríguez Talavera R., V. M. Castaño Meneses, M. Martínez Madrid, 2001, *Emulsiones Asfálticas*, Publicación Técnica 23, Instituto Mexicano del Transporte, ISSN 0188-7114, pp 29
- Rojas Gutiérrez, E., 2013, “*OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO ECOLÓGICO PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO*”, Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Rolón, J., D. Nieves, R. Huete, B. Blandón, A. Terán & R. Pichardo, 2007, “*Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón*”, Materiales de Construcción, 57 (288), 5-15
- Rubio Avalos J. C., W. Martinez Molina, E. M. Alonso Guzman, F. A. Velasco Avalos, 2014, *PATENTE Geopolímero Fotoluminiscente, MX 2008001086 A1*

- Ruggieri F., J. L. Fernandez-Turiel, J. Saavedra, D. Gimeno, E. Polanco, A. Amigo, G. Galindo, A. Caselli, 2012, “*Contribution of volcanic ashes to the regional geochemical balance: The 2008 eruption of Chaitén volcano, Southern Chile*”, *Science of the Total Environment* 425, 75–88
- Sánchez M. y P. Alaejos, 2006, “Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón estructural”, *Cemento y Hormigón*, 889, 54-61
- Tabsh, S. W., A. S. Abdelfatah, 2009, *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*, *Construction and Building Materials* 23, 1163–1167
- Topcu, I.B. & N. Guncan, 1995, “*Using waste concrete as aggregate*”, *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1385-1390
- Topcu, I.B. 1997, “*Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete*”, *Cement and Concrete Research*, 27 (12), 1817-1823
- Topcu, I.B. & S. Sengel, 2004, “*Properties of concretes produced with waste concrete aggregate*”, *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307-1312
- Torres Acosta A., E. Paredes Camarillo y E. Alonso Guzmán, 2014, “*De Concreto. El Material que transformó la Industria de la Construcción*”, *Revista Relatos e Historias en México*, VI (70) 62-67
- Valdés, G. et al, 2009, “*Estudio de las características físicas y mecánicas de hormigones y bloques de hormigón fabricados con áridos reciclados*”. XVII Jornadas Chilenas del Hormigón, octubre, Santiago, Chile
- Valdés, G., Reyes, O., González, G., (2011) “*Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción*” en *Ingeniería y Desarrollo*, 29 (1), 17-33
- Vázquez, E. et ál., 2004, Proc. RILEM International Conference on “The Use of Recycled Materials in Buildings and Structures”, Barcelona, Spain;
- Villicaña Cupa M. A., 2014, “*Innovación en el diseño de concreto; empleo de puzolanas para incrementar la durabilidad*”, Tesis Maestría, Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Xiaoa, J., J. Lia, Ch. Zhangb, 2005, Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cement and Concrete Research* 35, 1187– 1194
- Zalapa Damián, A., 2013, “*CONCRETO RECICLADO CON AGREGADOS PRODUCTO DE DEMOLICIÓN, ADICIONANDO FIBRAS DESHIDRATADAS DE CACTUS OPUNTIA BLANCO, PARA MODIFICAR SUS PROPIEDADES*”, Tesis Licenciatura Fac. Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México