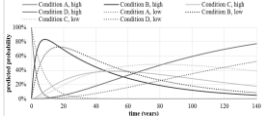
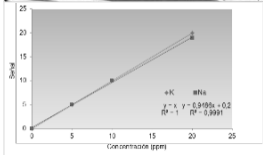
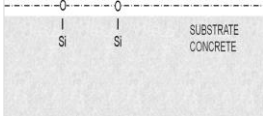
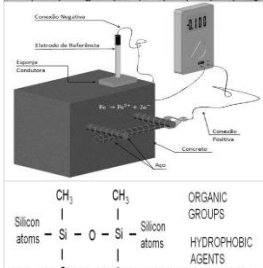


## SUMÁRIO

### Página

- A. Silva, J. de Brito, P. L. Gaspar, L. C. Neves:** Análise probabilística da evolução da degradação de revestimentos pétreos com utilização de cadeias de Markov. 162
- S. H., Lopes da Silva, C., Londero, M. H. F., Medeiros, V. C. O., Pereira, E. C. B., Monteiro:** Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica. 174
- H. Bolognini, N. Martínez, O. Troconis de Rincón:** Caracterização química e físico-mecânica de cimentos com adições de filler calcário na Venezuela 190
- L. Y. Gómez-Zamorano, G. García-Guillén, J. L. Acevedo-Dávila:** Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes. 203
- M. H. F. Medeiros, L. V. Real, V. A. Quarcioni, P. Helene:** Concreto com proteção de superfície e exposto à solução de cloretos: Espessura de cobrimento equivalente. 219
- Artigos de Revisão:**
- 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-Valdez:** Concreto reciclado: uma revisão. 234



## **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**

*Mensagem do Editor Chefe*

**REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROLE DA QUALIDADE, PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DA CONSTRUÇÃO**

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

É motivo de muita satisfação e alegria para a equipe da Revista ALCONPAT ver publicada a terceira e última edição do nosso quinto ano de divulgação.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é publicar estudos de casos relacionados com os temas da nossa associação, ou seja, controle de qualidade, patologia e reabilitação das construções, motivando desde já a apresentação de pesquisas básicas ou aplicadas que pudessem ser correlacionadas com os estudos de casos.

Nesta V5N3, começamos com o artigo procedente de **Portugal e Inglaterra**. A. Silva e seus colegas discutem os modelos de previsão de vida útil, onde extrapolam os dados para determinar o comportamento futuro dos elementos da construção, antecipando o ponto em que é necessário intervir. Este estudo também permite compreender a influência das condições de exposição na evolução da degradação dos revestimentos.

No segundo trabalho, SH, Lopes da Silva e seus colegas do **Brasil** discutem combinações de tipos de cimentos para obter a que apresenta a maior capacidade de proteger as armaduras contra a corrosão induzida por cloretos. Para isso, se baseia no método de Análise Hierárquica, o qual foi eficaz na escolha do tipo de cimento.

No terceiro artigo, da **Venezuela**, Humberto Bolognini e seus colegas relatam que nos últimos anos na Venezuela, tem-se apresentado uma crise sobre a demanda, produção e comercialização do cimento, o principal material de construção. Neste trabalho se apresenta a caracterização química e físico-mecânica realizada nas principais marcas de cimentos compostos comercializadas no país em questão, caracterizando-as de acordo com: sua composição química, finura Blaine, tempo de pega e resistência à compressão. Os resultados mostram que estes cimentos não satisfazem os requisitos mínimos estabelecidos na norma venezuelana para sua utilização na fabricação de concreto estrutural.

O quarto artigo é do **México**, Lauren Y. Gómez Zamorano e colegas apresentam uma pesquisa com foco sobre a avaliação do efeito que a substituição por adições diferentes e dois superplastificantes implica no desenvolvimento das propriedades mecânicas, formação de

fases e na evolução do calor de hidratação das pastas de cimento Portland com substituições de até 60%. Com base nos resultados foi comprovado que com a utilização de substituição por adições, a quantidade de hidróxido de cálcio é reduzida, devido à reação pozolânica, e resistência à compressão aumentada.

O quinto trabalho desta edição é escrito por Marcelo Medeiros e seus colegas do **Brasil**, que analisaram as contribuições relativas de três métodos de proteção da superfície do concreto sobre a eficiência dos tratamentos superficiais na inibição da penetração de íons cloreto. Alguns resultados indicaram que um concreto com determinados tipos de proteção pode atrasar o tempo de contaminação em até três vezes.

O sexto artigo é uma revisão do estado da arte, que vem do **México**, onde Elia Alonso Guzman e colegas discutem como a geração de resíduos sólidos do concreto, considerados como entulho, está se tornando um problema ambiental. A elaboração de concretos reciclados de concreto enfrenta a busca por traços otimizados para alcançar um melhor desempenho mecânico sob cargas estáticas e dinâmicas. Neste trabalho é realizada uma revisão sobre os avanços internacionais neste tema.

Cada edição da RA busca equilibrar a participação dos temas relacionados com o objetivo social da ALCONPAT International.

Agradecemos aos autores desta edição por sua voluntariedade e esforço para atender a qualidade e prazos estabelecidos.

Em cada nova edição da revista é publicado o artigo em seu idioma original, e antes da próxima edição será publicado as versões nos outros dois idiomas. As línguas oficiais da Revista ALCONPAT são Inglês, Espanhol e Português.

Pelo Conselho Editorial



Pedro Castro Borges  
Editor Chefe



## Análise probabilística da evolução da degradação de revestimentos pétreos com utilização de cadeias de Markov

A. Silva<sup>1</sup>, J. de Brito<sup>1</sup>, P. L. Gaspar<sup>2</sup>, L. C. Neves<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, IST, Universidade de Lisboa, e-mail: [anasilva931@msn.com](mailto:anasilva931@msn.com)

<sup>2</sup>Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa

<sup>3</sup>NTEC, 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.

### 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 inspecções 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.

### 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.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito

© 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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. INTRODUÇÃO

A degradação é um processo complexo e dinâmico, em que os agentes e mecanismos de degradação actuam sinergicamente e estão em constante permutação. Os estados actual e futuro das construções têm associados vários graus de incerteza. Para tentar superar esta dificuldade, é por vezes necessário recorrer a uma abordagem estocástica na previsão da vida útil (Frangopol et al., 2004). Regra geral, este tipo de abordagem tem uma elevada complexidade e assenta na premissa de que a deterioração é um processo regido por variáveis aleatórias (Moser, 2003). Assim, a degradação pode ser vista como um processo contínuo de perda de desempenho, que evolui probabilisticamente ao longo do tempo. O fenómeno de degradação pode ainda ser descrito como a transição entre estados de condição, caracterizados por diferentes níveis de degradação (Basso et al., 2012). As cadeias de Markov são um dos métodos que permite avaliar, estocasticamente, a condição futura dos revestimentos de fachada. As cadeias de Markov simulam a evolução do estado de degradação das construções, permitindo definir a probabilidade do desempenho futuro de um elemento da construção com base apenas no seu desempenho actual, ignorando a história de deterioração e de manutenção do elemento construtivo, a sua idade, além de outros parâmetros (Neves et al., 2006). No presente estudo, é aplicado um modelo baseado nas cadeias de Markov à previsão da vida útil dos revestimentos pétreos, permitindo analisar a distribuição probabilística de cada uma das condições de degradação ao longo do tempo (assim como o tempo médio de permanência em cada condição de degradação). Além disso, é analisada a influência de algumas características dos revestimentos na evolução do seu processo de degradação. Este tipo de modelo é crucial no âmbito da manutenção do património edificado, porque fornece dados relativos ao instante mais provável para a falha dos revestimentos em função das suas características, assim como as idades onde é extremamente improvável que se dê a rotura destes elementos, englobando a noção de risco associado à falha dos revestimentos, possibilitando assim a definição informada de planos de manutenção e de períodos de garantia e de cobertura por parte das seguradoras.

## 2. DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS

As cadeias de Markov baseiam-se num conjunto de estados discretos que caracterizam o desempenho das construções. Existem diversos métodos de avaliação do estado de degradação dos edifícios e seus componentes, que variam de acordo com a classificação hierárquica dos elementos de construção, a classificação hierárquica das anomalias e a definição de parâmetros de condição associados às anomalias (Straub, 2003). Diversos autores estabeleceram sistemas de classificação das anomalias ou escalas de degradação com o intuito de exprimir a degradação visual e funcional dos elementos analisados (Balaras et al., 2005; Shohet et al., 1999); nestes sistemas inclui-se a classificação das anomalias através de uma escala de variáveis discretas que variam desde o nível de condição mais favorável (situações de ausência de degradação visível) até à situação mais desfavorável (degradação extensa ou perda de funcionalidade). No presente estudo, foi adoptada uma escala com 5 níveis de degradação (entre a condição A - sem degradação visível - e a condição E - degradação generalizada). Esta classificação relaciona o estado de degradação dos revestimentos pétreos e a avaliação física e visual das fachadas no momento da inspecção (“Tabela 1”).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente estudo, foram inspeccionados 203 revestimentos em pedra natural (fixada directamente ao suporte) em condições reais de utilização. Para isso, recorreu-se apenas a inspecções visuais, avaliando *in situ* as características dos revestimentos, o seu estado de conservação (em função da escala descrita na Tabela 1, que atribui aos revestimentos inspeccionados um dado nível de degradação em função da área de revestimento pétreo afectado por um dado conjunto de anomalias), das suas características de exposição ambiental e das condições de manutenção. A amostra analisada é composta por edifícios dos séculos XIX e XX, destinados a diferentes usos: habitação, comércio ou serviços. A amostra foi seleccionada aleatoriamente; no entanto, procurou-se obter uma amostra coerente e representativa do tipo de pedra natural presente nos revestimentos pétreos existentes em Portugal. Além disso, a amostra obtida apresenta uma extensa gama de idades, onde o edifício mais recente tem apenas 1 ano e o edifício mais antigo apresenta 82 anos, permitindo assim avaliar com maior rigor o processo de envelhecimento e degradação dos elementos analisados. No presente estudo, assume-se que a idade é dada pelo período de tempo que decorre desde a última reparação até à data da inspecção (uma vez que uma intervenção no revestimento deverá repor as características iniciais, reiniciando assim o seu processo de degradação, no que diz respeito a modelos de previsão da vida útil). Nesta amostra, nenhum dos casos de estudo pertence à condição de degradação mais desfavorável (condição E). A “Figura 1” procura ilustrar as diferentes condições de degradação caracterizadas na Tabela 1.



Figura 1. Condições de degradação dos revestimentos pétreos

Tabela 1. Níveis de degradação dos revestimentos em pedra natural

Degradação física e visual	Condição de degradação
Não apresenta degradação visível	Condição A
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $\leq 15\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição B
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $\leq 30\%$ Anomalias em juntas $\leq 30\%$ Anomalias na fixação ao suporte $\leq 20\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição C
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $> 30\%$ Anomalias em juntas $> 30\%$ Anomalias na fixação ao suporte $> 20\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição D
Anomalias na fixação ao suporte $> 20\%$ Anomalias de perda de integridade $> 20\%$	Condição E

#### 4. ANÁLISE PROBABÍLISTICA DA DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS AO LONGO DO TEMPO

No presente estudo, recorre-se à função *fmincon* (*constrained nonlinear optimization*) presente no *software* MATLAB para obter a matriz intensidade ( $Q$ ), que permite obter a transição entre estados de degradação, em função do estado original e da taxa de transição entre o estado actual e o estado futuro. Com base nas taxas de transição entre condições de degradação, a probabilidade de transição entre estados de degradação pode ser obtida de acordo com a equação diferencial de Chapman-Kolmogorov. A matriz intensidade é obtida através da maximização do algoritmo de verosimilhança (Carrington et al., 2005), tal como representado na equação (1), sendo, para isso, utilizado no presente estudo o algoritmo numérico de conjunto activo (*active-set numerical algorithm* presente na função *fmincon*) (Kalbfleisch e Lawless, 1985). No presente estudo, com o objectivo de melhorar a estabilidade do algoritmo de optimização, é maximizado o algoritmo de verosimilhança (Fletcher e Powell, 1963; Higham e Higham, 2005), tal como representado na equação (1). A matriz  $Q$  obtida para os revestimentos pétreos é dada pela equação (2).

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

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

Através da matriz intensidade ( $Q$ ), é possível estimar o tempo de permanência em cada estado de degradação (“Figura 2”). Os revestimentos pétreos transitam mais rapidamente entre estados de condição mais favoráveis. Este resultado está directamente relacionado com a definição dos estados de degradação. É natural que a transição entre estados de degradação não seja feita de forma uniforme, uma vez que os estados de condição seguem uma escala que também não é constante. A condição A de degradação (mais favorável) corresponde a um revestimento pétreo sem deterioração e, portanto, para que um revestimento pétreo transite para a condição seguinte basta que apresente mudanças na uniformidade da superfície ou manchas pontuais. Parece, por isso, razoável que a transição da condição A para o estado de condição seguinte ocorra em média em apenas cerca de 4,5 anos.

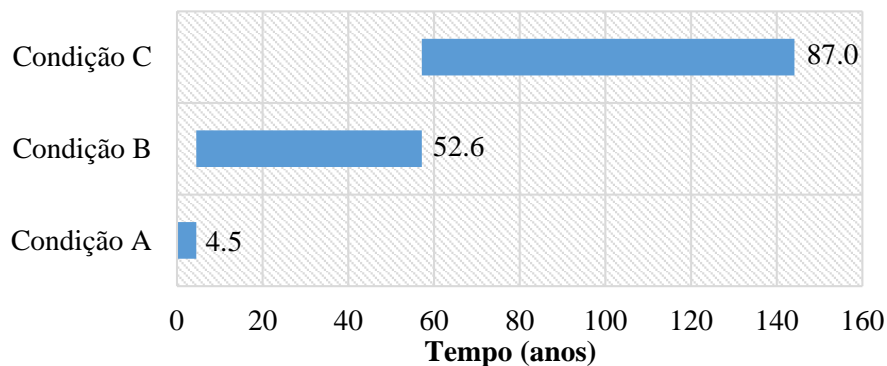


Figura 2. Representação do tempo médio de permanência em cada condição de degradação para os revestimentos pétreos



A distribuição probabilística da condição da degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo é apresentada na “Figura 3”. A probabilidade de pertencer à condição A vai diminuindo ao longo do tempo, sendo praticamente nula (inferior a 2%) a partir do ano 8. A probabilidade máxima (79,2%) de pertencer à condição B de degradação ocorre ao ano 12, começando a decrescer a partir dessa idade. Quanto à condição C, é atingido um pico máximo de probabilidade de pertencer a esta condição entre os anos 71 e 73 (com uma probabilidade de 46,1%). No que diz respeito à condição D, a probabilidade de pertencer a esta condição vai aumentando ao longo do tempo, sendo inferior a 10% antes do ano 41, e superior a 60% a partir do ano 145.

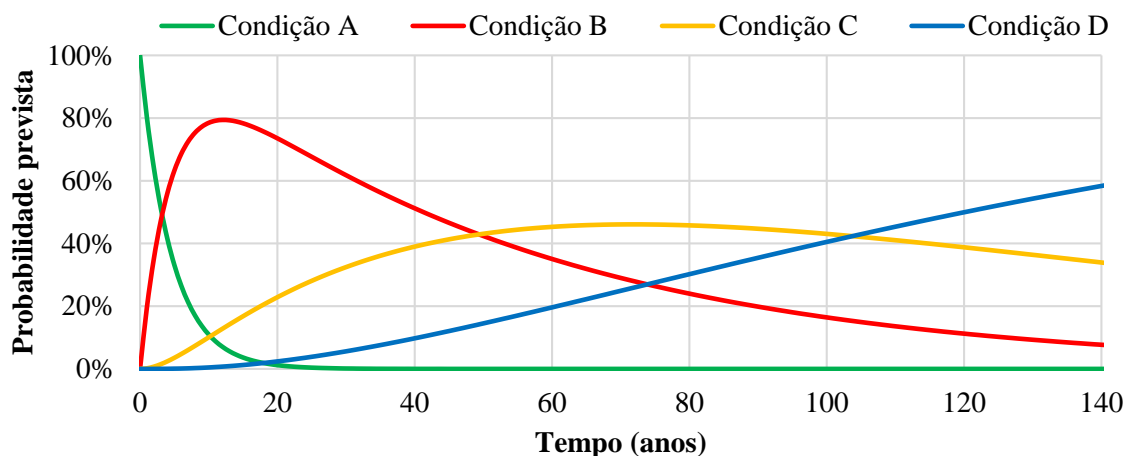


Figura 3. Distribuição probabilística da condição da degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo

A “Tabela 2” apresenta a probabilidade dos revestimentos pétreos pertencerem a cada uma das condições de degradação em função da sua idade.

Tabela 2. Probabilidade de pertencer a cada um dos níveis de degradação em função da idade

Intervalo de anos	Probabilidade de pertencer a cada uma das condições			
	Condição A	Condição B	Condição C	Condição 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 os anos 3 e 4, a probabilidade de um revestimento pétreo pertencer às condições A e B é semelhante. Entre os anos 49 e 50, a probabilidade de pertencer à condição B é idêntica à de pertencer à condição C. Entre os anos 103 e 104, a probabilidade de pertencer à condição C é semelhante à de pertencer à condição D. Nestes intervalos de tempo, verifica-se uma maior probabilidade de transição entre as condições de degradação.

Para avaliar a eficácia do modelo obtido através das cadeiras de Markov, compara-se o número de casos que pertencem a cada estado de degradação dados pelo modelo e observados em trabalho de campo (“Tabela 3”). O erro percentual obtido é relativamente baixo, dada a complexidade do fenómeno em análise.

Tabela 3 - Capacidade classificativa do modelo obtido através das cadeias de Markov para os revestimentos pétreos

Estado de degradação	Observado	Previsto	Erro percentual médio (%)
Condição A	9	12,096	34,40%
Condição B	114	105,419	7,53%
Condição C	57	63,959	12,21%
Condição D	23	21,527	6,41%

## 5. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS EM FUNÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS

Algumas características dos revestimentos pétreos condicionam significativamente a sua durabilidade. Assim sendo, são definidos vários modelos de cadeias de Markov que analisam a probabilidade de pertencer a cada condição de degradação, ao longo do tempo e em função dessas características. São assim analisadas as variáveis: (a) tipo de pedra; (b) tipo de acabamento; (c) dimensão da placa pétreo; (d) exposição à humidade; (e) e proximidade do mar. A discussão dos resultados obtidos é realizada na secção 6, sendo tecidas algumas considerações relativamente à durabilidade dos revestimentos pétreos em função das suas características.

### 5.1 Tipo de pedra

Koch e Siegesmund (2004) referem que a durabilidade é um requisito fundamental a ter em consideração quando se especifica as pedras naturais a utilizar como material de revestimento, principalmente em revestimentos exteriores, expostos a agentes ambientais de degradação. É pois relevante analisar a influência do tipo de pedra na progressão da degradação dos revestimentos. Na “Figura 4”, é apresentada a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função do tipo de pedra utilizada no revestimento. Os revestimentos em calcário são os que permanecem durante menos tempo na condição A de degradação; para os restantes tipos de pedra, o tempo de permanência nesta condição é semelhante. Quanto à condição B, em revestimentos em calcário, a probabilidade máxima ( $P = 85,2\%$ ) de pertencerem a esta condição ocorre no ano 7; para os revestimentos em mármore, o pico de probabilidade máxima ( $P = 73,7\%$ ) é atingido no ano 12 e para os revestimentos em granito, o pico de probabilidade máxima ( $P = 83,5\%$ ) ocorre no ano 18. Relativamente ao nível C, os revestimentos em mármore atingem uma probabilidade máxima ( $P = 44,7\%$ ) de pertencerem a esta condição entre os anos 55 e 56, os revestimentos em calcário atingem esse pico ( $P = 52,5\%$ ) entre os anos 66 e 67 e os revestimentos em granito atingem o pico máximo de probabilidade ( $36,7\%$ ) entre os anos 105 e 108 (significativamente mais tarde). A maior

probabilidade de transição entre as condições B e C ocorre: entre os anos 37 e 38, para os revestimentos em calcário; entre os anos 40 e 41, para os revestimentos em mármore; e entre os anos 106 e 108, para os revestimentos em granito.

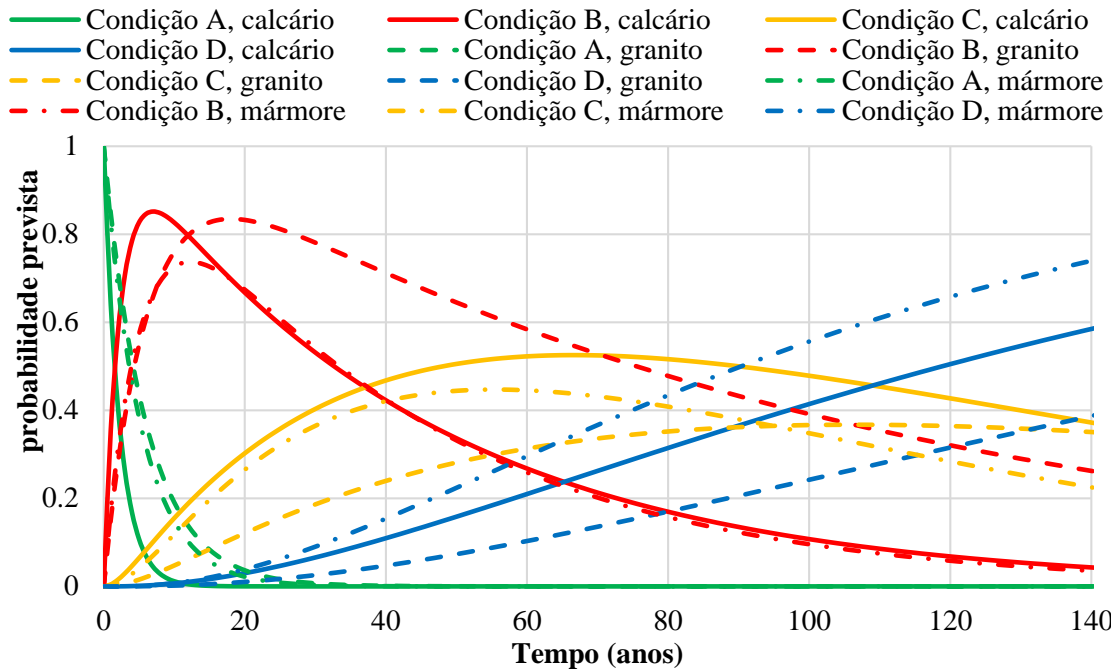


Figura 4. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função do tipo de pedra

### 5.2 Dimensão da placa pétrea

Na “Figura 5”, é apresentada a distribuição probabilística de pertencer a cada condição ao longo do tempo em função da dimensão da placa pétrea.

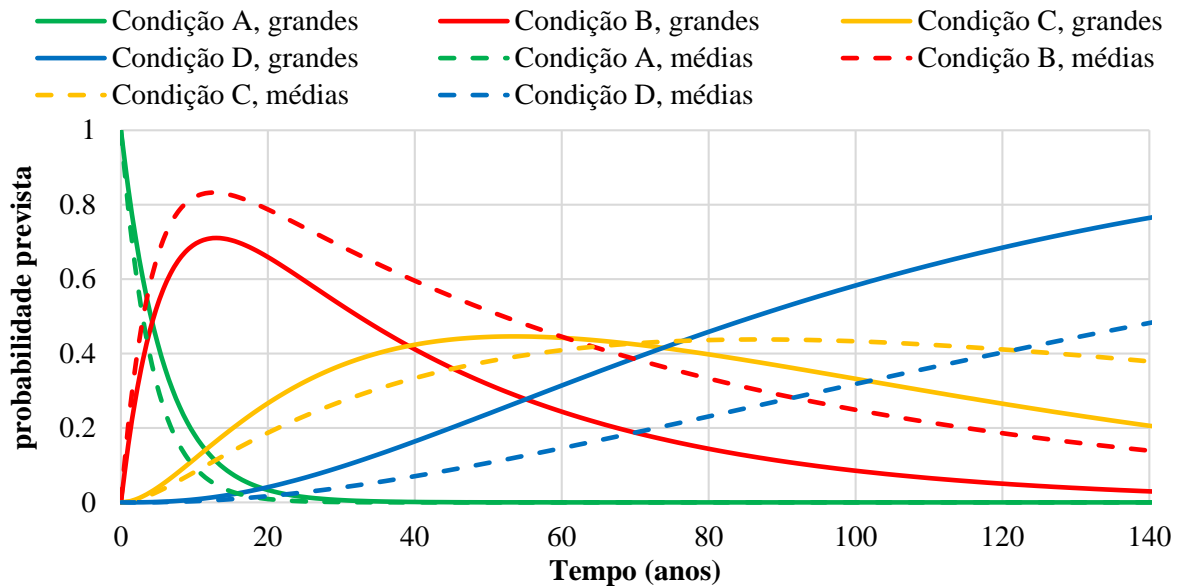


Figura 5. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da dimensão da placa pétrea

Os revestimentos pétreos com placas de grandes dimensões ( $A \geq 0,4 \text{ m}^2$ ) têm uma probabilidade máxima de pertencer à condição B por volta de 13 anos de idade ( $P = 71,1\%$ ) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 53 e 54 ( $P = 44,6\%$ ). Estes revestimentos apresentam uma probabilidade máxima de transição entre as condições B e C entre os anos 39 e 40 e uma probabilidade máxima de transição entre as condições C e D entre os anos 73 e 74. Por sua vez, os revestimentos com placas pétreas de médias dimensões ( $A < 0,4 \text{ m}^2$ ), apresentam uma probabilidade máxima de pertencer à condição B por volta de 13 anos de idade ( $P = 83,2\%$ ) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 86 e 88 ( $P = 43,8\%$ ). Para estes revestimentos, a transição entre as condições B e C tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 64 e 65, enquanto a transição entre as condições C e D têm maior probabilidade de ocorrência entre os anos 121 e 122.

### 5.3 Exposição à humidade

Na “Figura 6”, é apresentada a distribuição probabilística de pertencer a cada condição ao longo do tempo em função da exposição à humidade. Na definição do nível de exposição à humidade dos revestimentos pétreos são consideradas duas categorias: (i) exposição baixa, para edifícios localizados em contexto urbano, a mais de 5 km do mar e sem influência de ventos dominantes; (ii) edifícios em zonas costeiras, sem protecção da acção combinada do vento e da chuva. Os revestimentos com exposição alta à humidade transitam mais rapidamente da condição mais favorável (condição A) para a condição seguinte. Para revestimentos com exposição alta à humidade, a probabilidade de pertencer à condição B atinge um pico máximo por volta do ano 8 ( $P = 83,3\%$ ) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 51 e 52 ( $P = 38,7\%$ ). Os revestimentos com exposição baixa atingem uma probabilidade máxima ( $P = 72,7\%$ ) de pertencer à condição B no ano 17 e uma probabilidade máxima ( $P = 48,4\%$ ) de pertencer à condição C no ano 80.

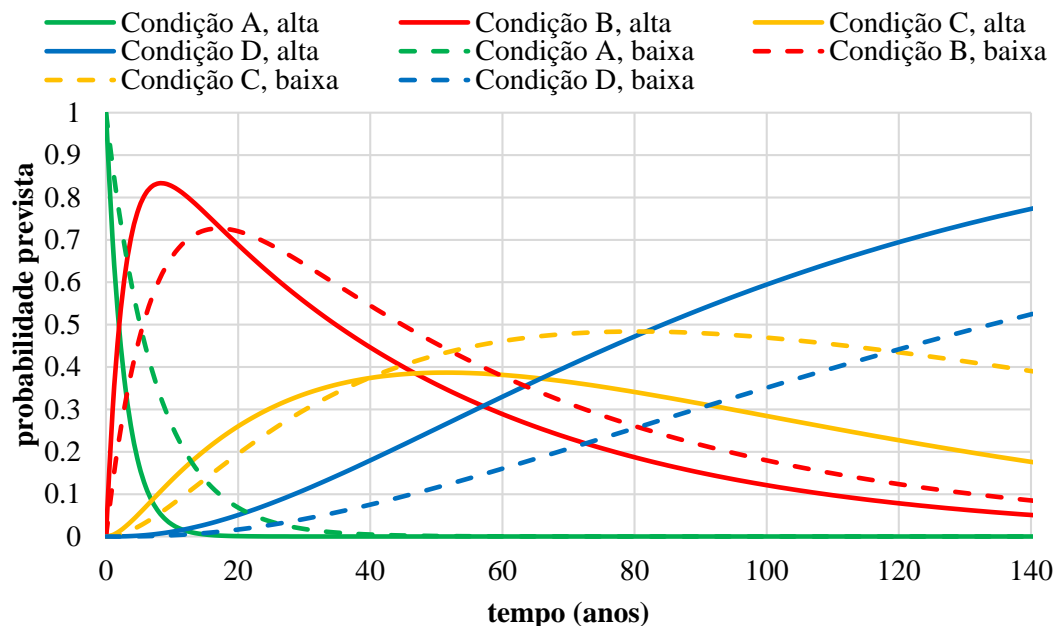


Figura 6. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da exposição à humidade

#### 5.4 Proximidade do mar

A “Figura 7” apresenta a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da proximidade do mar. A probabilidade e tempo de permanência na condição mais favorável (A) são praticamente os mesmos para as fachadas localizadas a mais de 5 km e a menos de 5 km do mar. Para fachadas na zona costeira, a probabilidade máxima de pertencerem à condição B é igual a 71,7% no ano 10 e a probabilidade máxima de pertencerem à condição C igual a 43,1% no ano 43. Os revestimentos localizados a mais de 5 km do mar têm uma probabilidade máxima de pertencerem à condição B igual a 84,6% no ano 13 e a probabilidade máxima de pertencerem à condição C igual a 41,3% entre os anos 92 e 94.

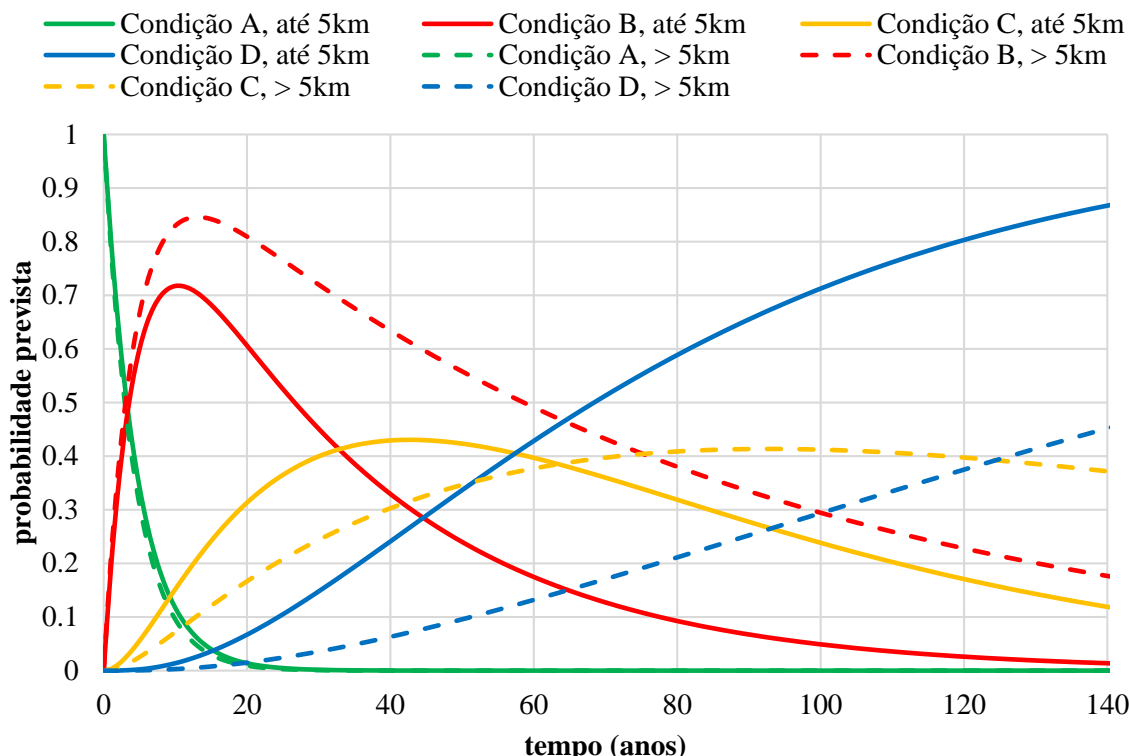


Figura 7. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da proximidade do mar

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na “Tabela 4”, apresenta-se a probabilidade de cada revestimento de pedra natural pertencer a cada condição de degradação em função das variáveis consideradas. Os resultados obtidos são coerentes e fisicamente credíveis, obtendo-se as seguintes conclusões principais:

- os revestimentos em granito apresentam uma probabilidade de 94,4% de pertencerem às condições de degradação mais favoráveis (A e B), com uma probabilidade nula de pertencer à condição D; os revestimentos em mármore são os que apresentam menor probabilidade de pertencer às condições mais favoráveis e uma maior probabilidade de possuírem a condição de degradação mais desfavorável; estes dados confirmam os resultados obtidos em estudos anteriores, que indicam que os revestimentos em granitos são os mais duráveis, atingindo o fim da vida útil mais tarde, seguidos dos revestimentos em calcário e dos revestimentos em mármore (cujo limite máximo de degradação é atingido mais cedo);

- os revestimentos com placas pétreas de médias dimensões têm menor probabilidade de pertencer a condições de degradação mais graves quando comparados com revestimentos com placas pétreas de grandes dimensões; confirmando assim a tendência de os revestimentos com placas pétreas de grandes dimensões apresentarem índices de degradação mais elevados, devido a uma maior concentração de tensões no sistema de revestimento, aliado a um peso próprio mais elevado (Silva et al., 2012);
- os revestimentos com exposição alta à humidade têm maior probabilidade de pertencer à condição mais elevada de degradação ( $P = 14,3\%$ , por oposição a  $P = 9,2\%$  para revestimentos com exposição baixa); os revestimentos com exposição alta também apresentam maior probabilidade (ainda que pouco significativa) de pertencer a condições mais favoráveis (A e B);
- os revestimentos localizados a mais de 5 km do mar têm maior probabilidade de pertencer às condições de degradação A e B ( $P = 68,6\%$ , por oposição a  $51,9\%$  para revestimentos a menos de 5 km); os revestimentos em zonas costeiras têm uma probabilidade de pertencer à condição mais grave de degradação de  $P = 26\%$ , substancialmente maior do que a dos revestimentos longe da costa ( $P = 2,5\%$ ), revelando assim que, tal como seria esperado, os revestimentos mais próximos da zona costeira apresentam níveis de degradação mais acentuados.

Tabela 4. Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação em função das variáveis consideradas

Variáveis consideradas		Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação			
		Condição A	Condição B	Condição C	Condição D
Tipo de pedra	Calcário	4,2%	45,8%	38,9%	11,1%
	Granito	5,6%	88,9%	5,6%	0%
	Mármore	3,9%	42,9%	33,8%	19,5%
Dimensão da placa pétrea	Médias	6,2%	65,1%	24,8%	3,9%
	Grandes	1,4%	40,5%	33,8%	24,3%
Exposição à humidade	Alta	6,0%	60,7%	19,0%	14,3%
	Baixa	3,4%	52,9%	34,5%	9,2%
Proximidade do mar	Até 5km	7,8%	44,2%	22,1%	26,0%
	> 5km	2,5%	66,1%	28,9%	2,5%

Os limites superior e inferior das condições C e D correspondem, respectivamente, ao limite máximo de degradação admissível, assumido no presente estudo como correspondendo ao fim da vida útil dos revestimentos de fachada. Assim sendo, a máxima probabilidade de transição entre a condição C e a condição D marca o instante com maior probabilidade de ser atingido o fim da vida útil dos revestimentos pétreos. Para a amostra global, a máxima probabilidade de transição entre as condições C e D ocorre entre os anos 103 e 104. No que diz respeito ao tipo de pedra, a maior probabilidade de transição entre as condições C e D ocorre: por volta do ano 109, para os revestimentos em calcário; entre os anos 77 e 78, para os revestimentos em mármore; e entre os anos 131 e 132 para os revestimentos em granito. Os resultados indicam que os granitos são o tipo de pedra mais durável, seguidos dos calcários e dos mármore; esta conclusão vem ao encontro de um estudo realizado por Schouenborg et al. (2007), que analisa 200 edifícios, testando a resistência mecânica da pedra natural, através de ensaios laboratoriais e *in situ*, e obtendo resultados semelhantes. Os

revestimentos com placas pétreas de médias dimensões transitam entre os níveis C e D substancialmente mais tarde (entre os anos 121 e 122) do que os revestimentos com placas de grandes dimensões (entre os anos 73 e 74). Quanto à exposição à humidade, a transição entre as condições C e D tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 65 e 66 para revestimentos com exposição alta e entre os anos 118 e 119 para revestimentos com exposição baixa, confirmando assim a tendência dos revestimentos com exposição alta se degradarem mais rapidamente. No que concerne à proximidade do mar, para revestimentos em zonas costeiras, a transição entre as condições B e C tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 32 e 33, enquanto a transição entre as condições C e D tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 57 e 58. Já os revestimentos afastados da costa (a mais de 5 km) têm maior probabilidade de transição entre as condições B e C entre os anos 75 e 76 e uma maior probabilidade de transição entre as condições C e D entre os anos 124 e 125. Os revestimentos em zonas costeiras são mais propensos a possuírem índices de degradação mais severos devido à exposição a ventos que contêm sais marinhos nocivos à pedra natural.

A distribuição de probabilidade da condição de degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo pode também ser interpretada como uma avaliação do risco de as fachadas não actuarem como seria esperado devido ao processo de degradação. Deste modo, ao definir o limite de risco aceitável, qualquer interveniente / decisor no processo construtivo pode visualizar a necessidade de reparação baseada na análise probabilística de um conjunto de dados. Para ilustrar este conceito, pode-se considerar que a “alta”, “média” e “baixa” probabilidade de pertencer a uma dada condição corresponde a um “alto”, “médio” e “baixo” risco associado às consequências das anomalias detectadas e ao custo de reparação, fornecendo assim uma indicação da urgência das acções de manutenção e reparação. Considera-se que um risco baixo (nenhuma acção é necessária para além da monitorização da evolução da degradação da fachada) corresponde a  $P > 75\%$  de pertencer às condições A ou B. Considera-se que um risco alto (necessita de uma reparação generalizada) corresponde a  $P > 25\%$  de pertencer à condição “D” e um risco médio corresponde às situações intermédias. A partir da interpretação dos resultados obtidos e em função dos pressupostos assumidos anteriormente, podem ser feitas algumas recomendações: i) os revestimentos pétreos devem ser monitorizados antes dos 20 anos; ii) devem realizar-se trabalhos de reparação antes dos 70 anos; iii) a partir dos 70 anos deve começar a ser considerada a substituição dos revestimentos.

## 7. CONCLUSÃO

Em modelos de previsão da vida útil, é relevante conhecer a taxa de transição entre estados de degradação, antevendo o comportamento do elemento em estudo e prevendo o momento a partir do qual ele será incapaz de dar resposta às exigências para as quais foi projectado.

No presente estudo, o desempenho futuro dos revestimentos pétreos é previsto através da utilização das cadeias de Markov, correspondendo a um modelo estocástico amplamente empregue no domínio da modelação da durabilidade, que necessita de pouca informação na sua calibração. Os modelos propostos no presente estudo são capazes de fornecer indicações relativas a um processo complexo como é a degradação das fachadas, dando informação relativa à sinergia entre os agentes de degradação (como é o caso das condições de exposição ambiental) e as condições ou níveis de degradação. Além disso, o presente estudo fornece informação relativa à distribuição probabilística da condição dos revestimentos ao longo do tempo (e em função das suas características mais relevantes), assim como o conhecimento do tempo médio de permanência em cada condição de degradação até à transição para a condição seguinte e a indicação dos efeitos da degradação na durabilidade dos revestimentos pétreos. Esta informação é útil na definição (de forma racional e tecnicamente informada) de um conjunto de estratégias de manutenção ao longo do ciclo de vida do

edifício. Quando este tipo de informação está disponível para vários componentes do edifício, é possível definir estratégias conjuntas de manutenção para as diferentes partes do edifício. Modelos estocásticos, como as cadeias de Markov, fornecem informação crucial no contexto das apólices de seguro, uma vez que permitem a avaliação do risco de falha dos revestimentos, permitindo avaliar o instante mais provável para a rotura dos elementos da construção de acordo com as suas características.

## 8. REFERÊNCIAS

- 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, 3<sup>rd</sup> 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*”, 6<sup>th</sup> 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*”, 8<sup>th</sup> 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.





## Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica

S. H. Lopes da Silva<sup>1</sup>, C. Londero<sup>1</sup>, M. H. F. Medeiros<sup>1</sup>, V. C. O. Pereira<sup>2</sup>, E. C. B. Monteiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Email: [sarahhlds@gmail.com](mailto:sarahhlds@gmail.com), [carolinalondero7@gmail.com](mailto:carolinalondero7@gmail.com), [medeiros.ufpr@gmail.com](mailto:medeiros.ufpr@gmail.com)

<sup>2</sup> Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Brasil.

<sup>3</sup> Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco e Universidade Católica de Pernambuco, Brasil. Email: [eliana@poli.br](mailto: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.

### 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 discuss 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 trough 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.

### RESUMEN

Este trabajo discute combinaciones de tipos de cementos, buscando obtener el de mayor capacidad de proteger el concreto de la corrosión del acero de refuerzo bajo la acción del ion cloruro. Para esto, se utilizó el método de Análisis Jerárquico (AHP) basado en la definición de elementos principales para la toma de una 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 CPIV32: con adición de puzolana), en dos relaciones agua/cemento (0.4 y 0.7) y dos edades de curado (7 y 28 días), a través del resultado de cinco ensayos. La aplicación del AHP evidenció ser eficaz para escoger el tipo de cemento, verificando que el cemento CPIII-40 presento el mejor desempeño entre los evaluados.

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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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. INTRODUÇÃO

O concreto constitui um dos principais materiais de construção utilizados na sociedade moderna, sendo o cimento Portland o material de construção mais adequado para essas estruturas, superando alternativas, também viáveis, como o aço e a madeira. Isso se deve à combinação de dois materiais que trabalham para resistir esforços distintos, sendo que o concreto resiste bem à compressão e o aço à tração, permitindo assim uma variedade de aplicações.

Seu uso intenso teve início a partir da década de 50, porém, até meados dos anos 70 acreditava-se que o concreto armado era um material que não se deteriorava. No entanto, nessa época, as estruturas compostas pelo material começaram a apresentar significativas manifestações patológicas, fazendo com que surgisse uma preocupação quanto à durabilidade do mesmo (MEDEIROS, 2008).

A partir disso, muitas pesquisas foram realizadas com o objetivo de exprimir a incidência das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. Assim, Andrade (1997) concluiu que 64% das manifestações patológicas encontradas nas edificações no estado de Pernambuco, consistiam em corrosão de armaduras por ataque intensivo de íons cloreto.

Portanto, a deterioração das estruturas de concreto armado devido à corrosão de armaduras representa um dos grandes problemas da Construção Civil. Isso porque o custo para reparo destas é elevado, podendo corresponder a 3,5 % de prejuízo anual do produto nacional bruto do Brasil, devido a investimentos em previsão da corrosão e em manutenção ou substituição de elementos estruturais prejudicados pela corrosão (DOTTO, 2006).

O citado processo ocorre por um mecanismo eletroquímico que dispõe impreterivelmente pelo menos de uma reação de oxidação e uma de redução que ocorrem simultaneamente. Porém, há três condições básicas para que ocorra a corrosão das armaduras: existência de um eletrólito; diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio (BARBOSA et al., 2012). Segundo Pereira et al. (2013), a corrosão de armadura pode ser influenciada por fatores tais como as propriedades de concreto, tempo de exposição ao agente agressivo, condições da superfície da barra de aço, características do ambiente onde a estrutura está inserida, entre outros. Normalmente o concreto oferece um grau de proteção contra a corrosão ao aço, devido à formação de uma fina película de óxidos protetora em sua superfície, em virtude da alta alcalinidade do material. No entanto, na presença de íons cloretos a partir de 0,4 % da massa de cimento, a película que antes protegia a armadura é rompida e o aço torna-se despassivado propiciando a corrosão.

Nesse sentido, pesquisadores como Page et al. (1986), Tessari (2001), Mather (2004), Sakr (2004) e Pereira (2011), fizeram estudos sobre a influência dos tipos de cimento e suas adições na proteção contra o ataque de íons cloreto. Segundo esses pesquisadores, as adições dos diversos tipos de cimento podem contribuir com benefícios como redução a permeabilidade e porosidade capilar. Portanto, com esses benefícios e suas influências na questão da corrosão de armaduras, surgiu o pressuposto de que os tipos de cimento influenciam na proteção à corrosão de armaduras causada por íons cloreto.

Conforme o exposto e utilizando-se os dados obtidos da dissertação de mestrado de Pereira (2011), este trabalho apresenta uma discussão, a partir da Análise Hierárquica, sobre a escolha de alguns tipos de cimento da região Nordeste do Brasil, CPII-Z-32 (cimento Portland composto com pozolana), CPIII-40 (cimento Portland de alto-forno) e CPIV-32 (cimento Portland pozolânico), quanto à corrosão das armaduras sob a ação de íons cloreto.

## 2. FATORES DE INFLUÊNCIA NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND

A corrosão das armaduras pode ocorrer por processos nocivos de natureza química ou eletroquímica. Para o caso de elementos estruturais de concreto armado expostos ao ataque de íons cloreto, principalmente em ambientes marítimos, percebe-se que são frequentes as manifestações patológicas como: fissuração, lascamento e destacamento da camada de cobrimento. Para tanto, a causa destas manifestações encontra-se no processo de perda de seção das barras de aço devido à própria corrosão das mesmas, que por sua vez acarreta na formação de produtos expansivos no interior do concreto.

Para que não ocorra o processo de corrosão é necessário, primeiramente, que o concreto encontre-se em um meio alcalino provido por hidróxidos. Sendo assim, devido à alta alcalinidade, forma-se sobre a superfície das barras de aço uma película de óxidos que atua como barreira de proteção destas. Porém, se existir contaminação por cloretos, a corrosão de armaduras pode ocorrer mesmo com o pH do concreto estando por volta de 13 como no concreto novo.

Como a corrosão em questão ocorre em meio aquoso, o processo é caracterizado como eletroquímico, ou seja, pressupõe que exista uma reação de oxidação e uma de redução, e circulação de íons através do eletrólito, sendo esta responsável pela deterioração do concreto (HELENE, 1993).

Um dos principais fatores de influência da corrosão é a estrutura de poros da camada de cobrimento, que se for de elevada absorção deve resultar em um processo de corrosão mais acelerado. Desse modo, o ingresso de água, variável dependente da porosidade, é de grande importância por controlar o teor de umidade, oxigênio, CO<sub>2</sub> e principalmente de cloretos dentro do concreto (CERVO, 2001). Sendo assim, torna-se importante a avaliação do tipo de cimento, da relação água/cimento e das condições de cura como influências para o processo corrosivo de armaduras por ataque de cloretos.

A composição química do cimento também influencia significativamente no processo de corrosão devido à presença de íons cloretos, pois o aluminato tri cálcico (C<sub>3</sub>A) e o ferro aluminato tetra cálcico (C<sub>4</sub>AF) combinam-se com os cloretos formando os cloro-aluminatos. O aluminato tri-cálcico tem a capacidade de imobilizar os íons cloretos, por meio da formação de um composto insolúvel, o cloro aluminato de cálcio hidratado (PAGE *et al.*, 1986). O trabalho de Hoppe Filho *et al.* (2013), aplicando a técnica de difração de raios X, também indica a formação de cloro-aluminato em concreto submetido ao contato com solução aquosa de íons cloretos.

É importante salientar que, as adições minerais como as pozolanas na composição do cimento, reduzem a porosidade deixando o concreto menos suscetível à percolação de líquidos, portanto, diminuindo a permeabilidade. Além disso, as pozolanas possuem boa capacidade de retenção de cloretos, por em geral, apresentarem elevados teores de alumina (CERVO, 2001).

Assim como a composição química do cimento, a relação água/cimento influencia diretamente na forma, no tamanho e na distribuição dos poros. Portanto, um dos fatores regentes da penetração de cloretos é esta relação. Isso ocorre, pois a baixa relação a/c diminui a porosidade do concreto diminuindo a penetrabilidade e difusibilidade. Desta forma, diversas pesquisas propuseram estudos de penetração de íons cloreto em função de diferentes relações água/cimento. Esses estudos comprovaram que quanto mais baixa a relação a/c, menor a quantidade de penetração de cloretos (GASTALDINI *et al.*, 2010).

Outro fator de influência sobre a difusibilidade dos íons cloretos em compósitos de cimento Portland é a cura que também influencia a formação da estrutura dos poros na pasta de cimento

Portland. Quanto maior o tempo de cura do concreto, maior a resistência à entrada de agentes agressivos, pois há uma melhora nas condições internas e superficiais do revestimento devido a hidratação do cimento.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho consiste em uma aplicação da ferramenta de tomada de decisão designada Análise Hierárquica, que precisa tomar como alicerce uma base de dados para fundamentação de uma dada escolha em uma aplicação específica. A seguir estão apresentadas as condições e premissas adotadas neste trabalho, que teve como foco a escolha do tipo de cimento mais adequado em uma condição de execução de obras submetidas a um ambiente contaminado por íons cloretos.

#### 3.1. Dados do estudo usado como base de dados para a AHP

O trabalho usado como banco de dados desta aplicação de AHP foi desenvolvido por Pereira (2011). Neste trabalho, foram usadas as variáveis de estudo a seguir:

- Relação água/cimento (2 níveis –  $a/c = 0,4$  e  $0,7$ ) – foram escolhidos dois níveis de relação  $a/c$  bem diferentes para tentar evidenciar o efeito deste parâmetro de forma mais significativa;
- Tipo de cimento (3 níveis - CII-Z-32, CIII-40 e CIV-32) - Esta escolha foi baseada nas capacidades de proteção em ambientes contaminados por cloretos. Os cimentos CII-Z-32 e CIV-32 utilizados na pesquisa são compostos com, respectivamente, 12% e 43% de pozolana natural proveniente de rocha, e na composição do CIII-40 há 67% de escória de alto-forno;
- Processo de cura (2 níveis – 7 e 28 dias em câmara úmida) – foram escolhidos dois períodos de cura em câmara úmida com o intuito de quantificar a magnitude da importância de elevar o tempo de cura de compósitos de cimento Portland.

Durante o programa experimental preocupou-se em manter as mesmas condições dos corpos de prova confeccionando-os dentro da mesma faixa de trabalhabilidade, variando entre 260 mm e 300 mm. Para a realização dos ensaios complementares foram adotados corpos de prova cilíndricos de argamassa de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Já para o ensaio de corrosão acelerada foram confeccionados corpos de prova prismáticos nas dimensões de 60 x 80 x 25 mm, com duas barras de 5 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento e com 10 mm de revestimento.

Após devidamente curados e secos em ambiente de laboratório por 15 dias, os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de corrosão que consistiu em semiciclos de secagem e umectação por imersão parcial em uma solução aquosa com 5% de NaCl, durante três meses. Os semiciclos caracterizam-se em 5 dias em que os corpos de prova ficavam dentro da estufa, e depois 2 dias em que os mesmos ficavam parcialmente submersos na solução citada.

Para a execução do ensaio de corrosão acelerada foi necessário que houvesse como aparelhagem os seguintes itens: um eletrodo de referência, um dispositivo de junção elétrica, cabos elétricos e um voltímetro de alta impedância. Para medição do potencial de corrosão conectou-se os pólos positivo e negativo, respectivamente, à barra de aço e ao eletrodo de referência. Dessa forma, o voltímetro indica a intensidade da diferença de potencial entre as semicélulas, sendo um parâmetro indicativo da ocorrência ou não de corrosão de armaduras (PEREIRA, 2011).

Para o fechamento do circuito é necessário uma interface condutiva entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho (barra de aço) e isso foi feito usando uma esponja saturada colocada no contato elétrico entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto. A Figura 1 ilustra a configuração do ensaio de determinação do potencial de corrosão (MEDEIROS et al., 2013).

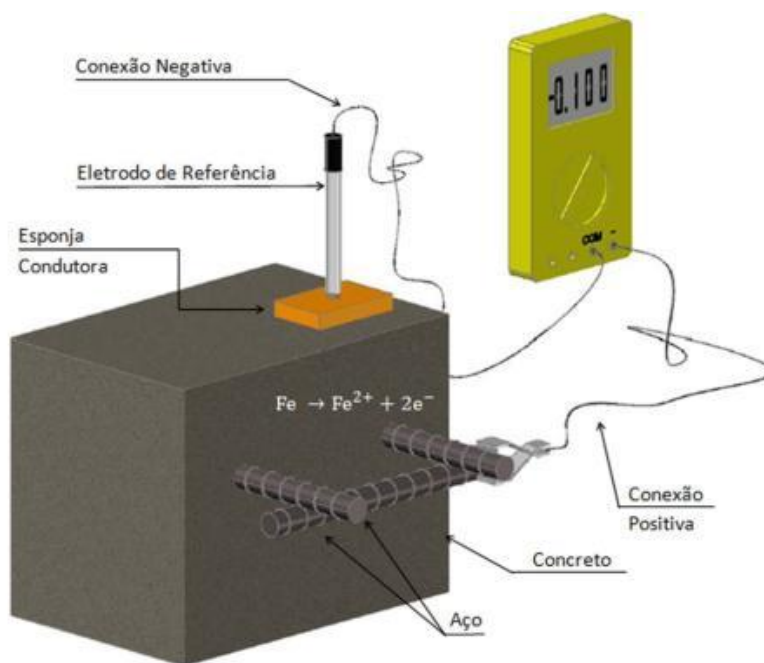


Figura 1. Configuração do circuito para determinação do potencial de corrosão (ROCHA, 2012; MEDEIROS et al., 2013)

O objetivo do método não é quantificar a corrosão do aço, uma vez que a taxa de corrosão não é determinada com o procedimento. Segundo Medeiros, Balbinot e Helene (2010), o potencial de corrosão identifica os locais da peça em estudo onde as condições termodinâmicas são favoráveis ao início do processo de corrosão, ainda que a armadura não apresente sinais na superfície de concreto que o envolve.

Para a avaliação da probabilidade de corrosão, foi empregado o procedimento recomendado na ASTM C 876 (2009), sendo que para o potencial de corrosão referente ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre ( $E_{corr}$ ) menor que  $-350$  mV, a probabilidade de corrosão é maior que 90%. E para  $E_{corr}$  maior que  $-200$  mV, a probabilidade de corrosão é menor que 10%.

Além do ensaio de envelhecimento acelerado, realizou-se os ensaios complementares de absorção por imersão (ABNT NBR 9778:1987), absorção por capilaridade (ABNT NBR 9779:1995) e resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997). O intuito do autor em realizar os ensaios complementares foi de auxiliar na compreensão e interpretação do ensaio principal.

### 3.2. Método de Análise Hierárquica

A tomada de decisão para problemas complexos exige um tratamento de dados simplificados, entretanto sistemático a fim de obter resultados rápidos, confiáveis e que não sejam onerosos.

Levando em consideração fatores de importância para a realização de uma determinada escolha, Saaty desenvolveu em 1971 a técnica da análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*). O AHP consiste em uma ferramenta de decisão multicritério abordando fatores que são organizados em uma estrutura hierárquica (SAATY, 1990).

Na engenharia civil, o potencial da análise hierárquica tem sido pouco explorado, porém pode-se citar exemplos de estudos que usaram esta ferramenta como instrumento de decisão, tais como: 1 - Marchezetti et al. (2011), no tratamento de resíduos domiciliares; 2 - Silva e Souza (2011), na seleção de caminhões coletores-compactadores de resíduos sólidos; 3 - Lisboa e Waisman (2006) e Zayed et al. (2008) nas decisões relacionadas a área de projeto de rodovias; 4 - Pan (2008), na

seleção de métodos de construção de pontes; 5 - Lai et al. (2008), no projeto de obras públicas; 6 – Pereira, Medeiros e Levy (2012), para a escolha de percentuais de substituição de resíduos de construção como agregados na dosagem de concretos; 7 – Mattana et al. (2012), na escolha de argamassas de revestimento; 8 – Pereira et al. (2014), na escolha de argamassas colantes para aplicação no sistema piso sobre piso.

O método do AHP desenvolve três principais operações, que correspondem à construção de uma hierarquia, a análise de prioridades e verificações de consistências. A construção da hierarquia consiste em destrinchar as partes componentes do problema e organizá-las em níveis. Já para as análises de prioridade realiza-se uma comparação dos elementos de cada nível com base no conhecimento e experiência do decisor. Por fim, executam-se verificações de consistência para garantir a coerência entre as comparações (HO, 2008).

Dessa forma, antes de iniciar a aplicação da técnica do AHP faz-se necessário definir o objetivo, que neste trabalho consiste em escolher um tipo de cimento, uma relação água/cimento (a/c) e um tempo de cura, como especificados anteriormente, capaz de melhor proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob a ação de íons cloreto. Assim, as alternativas de escolha para esse trabalho encontram-se dispostas na Tabela 1. Analisou-se cada situação procurando-se obter e comparar o melhor tipo de cimento para cada relação a/c e tempo de cura.

Tabela 1. Combinação dos tipos de cimento para dois níveis de relação a/c e de cura

<b>Tipo do cimento</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Tempo de cura</b>
CP II-Z-32	0,4	07 dias
CP II-Z-32	0,4	28 dias
CP II-Z-32	0,7	07 dias
CP II-Z-32	0,7	28 dias
CP III-40	0,4	07 dias
CP III-40	0,4	28 dias
CP III-40	0,7	07 dias
CP III-40	0,7	28 dias
CP IV-32	0,4	07 dias
CP IV-32	0,4	28 dias
CP IV-32	0,7	07 dias
CP IV-32	0,7	28 dias

Após a definição das opções de escolha, representados na Tabela 1, instituiu-se os critérios a serem considerados na avaliação do desempenho das alternativas. Pereira (2011) analisou o resultado de três ensaios principais sendo absorção de água, resistência à compressão e corrosão acelerada, que encontram-se no nível primário da hierarquia. O ensaio de absorção de água abrange outros três ensaios dispostos no nível secundário da hierarquia, e o ensaio de corrosão acelerada também envolve dados do ensaio de evolução do potencial de corrosão, embasado por dados obtidos com a variação da massa dos corpos de prova.

Na Figura 2 encontra-se a árvore hierárquica demonstrando os níveis analisados e os critérios considerados.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores da matriz de decisão do primeiro nível hierárquico indicando os pesos de cada parâmetro. Como os ensaios de absorção de água e resistência à compressão foram considerados levemente menos importantes que o ensaio de corrosão acelerada,

esses ao serem comparados com o último receberam valores inversos para padronização da tendência dos dados.

Tabela 3. Matriz de decisão do primeiro nível do AHP

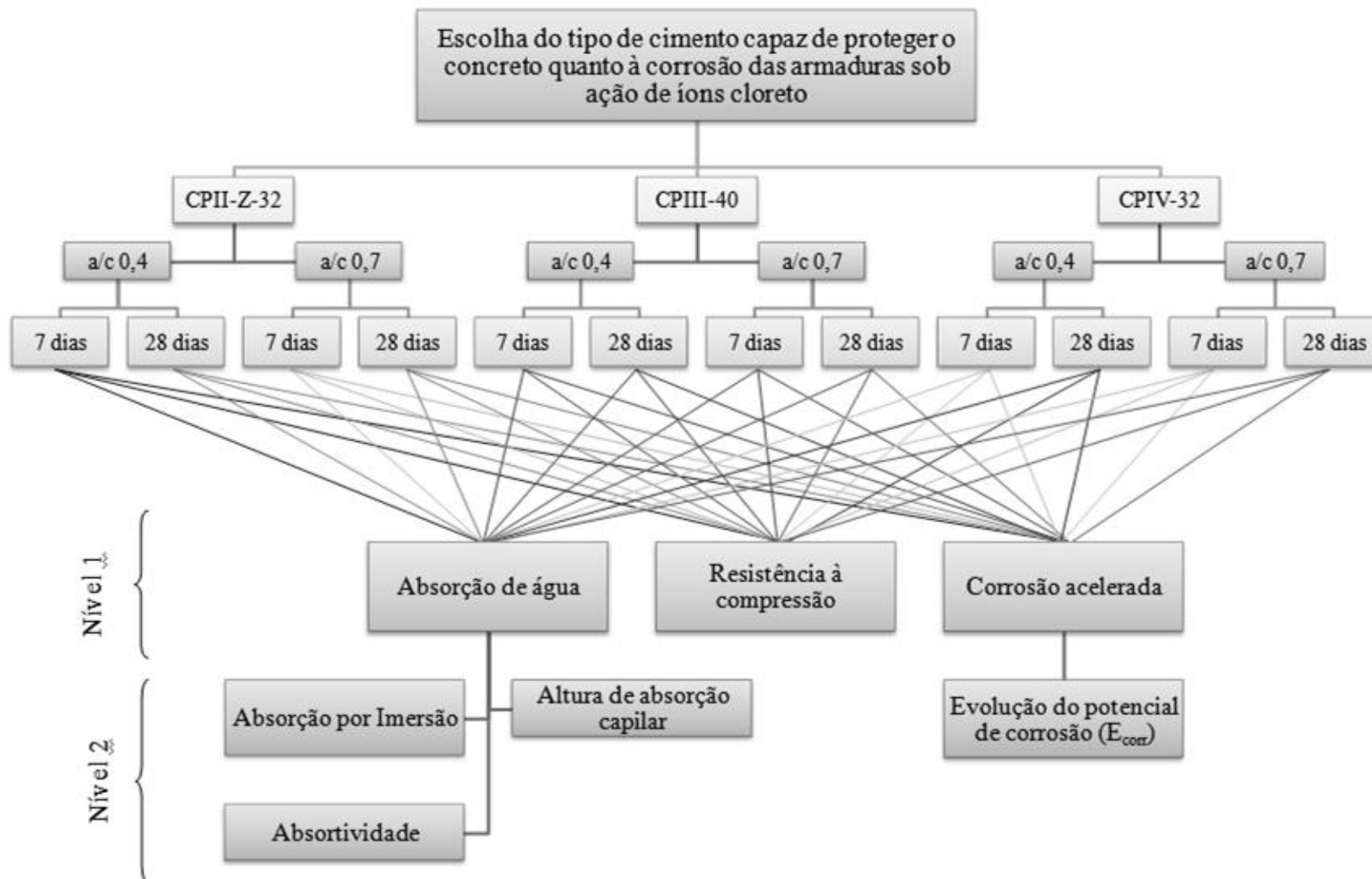
	Absorção de água	Resistência à compressão	Corrosão acelerada	Total da linha (Tl)	Importância relativa
Absorção de água	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Resistência à compressão	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Corrosão acelerada	3,00	3,00	1,00	7,00	0,60
Total geral (Tg)				11,67	1,00

Na elaboração da matriz de decisão do segundo nível hierárquico optou-se por considerar todos os critérios analisados como de mesmo grau de importância. Esta prática foi realizada porque é muito difícil e subjetivo atribuir diferentes níveis de importância para cada um dos três resultados de absorção de água. Na Tabela 4 estão dispostos os valores da matriz de decisão do segundo nível hierárquico.

Tabela 4. Matriz de decisão do segundo nível do AHP

	Absorção por imersão	Altura absorção capilar (cm)	Absortividade (Kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	Total da linha (Tl)	Importância relativa
Absorção por imersão	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Altura absorção capilar (cm)	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Absortividade (Kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Total Geral (Tg)				9,00	1,00

Figura 2. Árvore de hierarquia com os critérios e níveis de análise





Após desenvolver as matrizes de decisão com os pesos de cada critério, calculou-se a consistência do AHP, através do teste de consistência fundamentado por Saaty (2000) e apontado por Costa (2002). Desse modo, determinou-se a razão de consistência, que deve ser um valor menor ou igual a 0,1. No caso deste estudo, o cálculo da razão resultou em 0 (zero) para as duas matrizes desenvolvidas, sendo menor que o limite estabelecido. Dessa forma, a AHP montada é considerada perfeitamente consistente.

Neste trabalho, todos os dados empregados na comparação dos critérios de análise são quesitos quantitativos, ou seja, utilizou-se os valores numéricos extraídos dos resultados dos ensaios realizados por Pereira (2011), como segue na Tabela 5.

O ensaio de evolução do potencial de corrosão foi executado com 12 ciclos de secagem e umectação (em solução de NaCl a 5%) e duração total de 84 dias. Para avaliação do desempenho dos cimentos considerou-se as médias de todos os resultados somente das fases de umectação, que pela presença da água apresenta os valores mais representativos em relação à probabilidade de corrosão.

Tabela 5. Dados gerais para elaboração do AHP

Tipo de cimento	CPII				CPIII				CPIV			
	7 dias		28 dias		7 dias		28 dias		7 dias		28 dias	
Relação 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 ascensão 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
Absortividade (Kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	1,27	1,93	1,14	1,87	0,97	1,37	0,89	1,24	1,26	1,72	0,98	1,48
Absorção por imersão (%)	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11
Resistência à compressão (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 corrosão (mV)	-387	-474	-379	-492	-406	-514	-339	-462	-460	-481	-434	-503

#### 4. RESULTADOS - APLICAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Com a presente pesquisa, utilizando os dados de ensaios realizados por Pereira (2011) e através do método da Análise Hierárquica, buscou-se obter o melhor tipo de cimento (CPII-Z-32, CPIII-40 e CPIV-32) quanto à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto, considerando também dois níveis de relação a/c (0,4 e 0,7) e dois tempos de cura (7 e 28 dias). Os resultados das análises foram verificados separadamente pela combinação dos elementos de escolha, gerando duas matrizes de análise comparando os tipos de cimento com a relação a/c de 0,4 tanto para 7 dias de cura como para 28 dias, e mais duas matrizes com os tipos de cimento para relação a/c de 0,7 e tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

Para otimizar o espaço e objetivar os resultados do presente trabalho, optou-se por apresentar o detalhamento dos procedimentos de avaliação apenas da matriz de decisão dos tipos de cimento

para relação a/c de 0,4 aos 7 dias, que encontra-se descrito no item que segue. Para as outras matrizes, escolheu-se demonstrar apenas as tabelas finais com os índices de desempenho e avaliação final. Assim fica claro para o leitor a forma de chegar-se nas análises finais por AHP.

#### 4.1. Escolha do cimento para relação a/c 0,4 e cura de 7 dias

Após obter o conhecimento dos critérios considerados no AHP e estabelecer os pesos para comparação dessas propriedades, o avaliador deve realizar a normalização dos dados para a devida verificação do desempenho. Para isso divide-se o valor de cada quesito pelo maior valor da linha, a fim de que todos os critérios apresentem a mesma grandeza de valores, compreendida entre 0 e 1.

Os valores dos ensaios relacionados à absorção de água e potencial de corrosão precisaram ser invertidos, já que quanto menores fossem os resultados, melhor o desempenho. Ao converter os dados é possível uma padronização de análise pelos maiores valores agregando coerência à avaliação. Na Tabela 6 segue os dados padronizados e normalizados dos ensaios referentes à absorção de água (absorção por imersão, altura de ascensão capilar e absorvidade), resistência à compressão e corrosão acelerada (potencial de corrosão).

Tabela 6. Valores modificados e normalizados usados no AHP

Dados de Análise		Valores modificados			Valores normalizados		
		CP II	CP III	CP IV	CP II	CP III	CP IV
Critérios	Absorção por imersão (%)	9,09	8,33	7,69	1,00	0,92	0,85
	Altura ascensão capilar (cm)	0,21	0,29	0,23	0,74	1,00	0,81
	Absorvidade (Kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )	0,79	1,03	0,79	0,76	1,00	0,77
	Resistência à compressão	34,50	47,52	37,09	0,73	1,00	0,78
	Potencial de corrosão (mV)	0,00259	0,00246	0,00217	1,00	0,95	0,83

Ao multiplicar o valor normalizado de cada quesito (Tabela 6) pela importância relativa de cada critério (Tabela 4), e ainda pelo número 100, para obter valores em porcentagem, foi possível obter os índices de desempenho de cada um. Como exemplo, na Equação (1) segue descrito o procedimento de cálculo do índice de desempenho do critério de absorção por imersão para o CP II com a/c 0,4 aos 7 dias.

$$I_c = V_{ni} \times P_c \times 100 \quad (1)$$

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

$$I_c = 33,33$$

Onde,

$I_c$ : índice de desempenho do critério

$V_{ni}$ : valor normalizado do critério

$P_c$ : importância relativa do critério

Após isso, somam-se os índices de desempenho dos critérios de comparação correspondentes a absorção de água. Os índices de desempenho dos critérios de resistência à compressão e evolução do potencial de corrosão não são somados, por cada critério se tratar de um ensaio isolado. Na Tabela 7 seguem os índices de desempenho dos critérios.

Por fim a avaliação final é a soma dos índices de desempenho multiplicados pela importância relativa (Tabela 3) de cada propriedade analisada. O procedimento de cálculo para a avaliação final do CP II segue exemplificado pela Equação (2).

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

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

$$Af = 91,24$$

Onde,

Af: avaliação final

$I_p$ : índice de desempenho da propriedade

$P_p$ : importância relativa da propriedade

Tabela 7. Índices de desempenho para os tipos de cimento com a/c 0,4 aos 7 dias de cura

Dados de Análise		Índices de desempenhos		
		CP II	CP III	CP IV
Absorção de água	Absorção por imersão (%)	33,33	30,56	28,21
	Altura ascensão capilar (cm)	24,82	33,33	27,13
	Absortividade ( $Kg/m^2h^{1/2}$ )	25,46	33,33	25,66
	Índice de Desempenho	83,62	97,22	81,00
Res. compressão	Resistência à compressão	72,60	100,00	78,05
	Índice de Desempenho	72,60	100,00	78,05
Corrosão acelerada	Potencial de corrosão (mV)	100,00	95,26	83,99
	Índice de Desempenho	100,00	95,26	83,99

Os resultados da avaliação de cada tipo de cimento encontram-se descritos na Tabela 8. O melhor resultado entre as combinações dos tipos de cimento, relações a/c e tempos de cura é o que apresenta o maior valor na avaliação final.

Tabela 8. Avaliação final para os tipos de cimento com a/c 0,4 aos 7 dias de cura

	Absorção água	Resistência a Compressão	Corrosão Acelerada	Avaliação final
Importância 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 o caso estudado, buscando o melhor tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto, considerando uma relação a/c de 0,4 e tempo de cura de 7 dias, a opção que apresentou o melhor desempenho conforme Análise Hierárquica foi o cimento do tipo CPIII-40, seguido do cimento CPII-Z-32 e CPIV-32.

#### 4.2. Escolha do cimento para demais combinações de a/c e tempo de cura

Os procedimentos de cálculo demonstrados anteriormente, para a escolha do tipo de cimento com relação a/c de 0,4 aos 7 dias de cura, foram os mesmos adotados para as outras combinações de relação a/c e tempo de cura. Assim, como forma de simplificar a apresentação dos resultados, nas Tabelas 9, 10 e 11 estão colocados os dados dos índices de desempenho e a avaliação final das outras matrizes em análise.

Tabela 9. Avaliação final para os tipos de cimento com a/c 0,4 aos 28 dias de cura

	Absorção água	Resistência a Compressão	Corrosão Acelerada	Avaliação 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

Tabela 10. Avaliação final para os tipos de cimento com a/c 0,7 aos 7 dias de cura

	Absorção água	Resistência a Compressão	Corrosão Acelerada	Avaliação 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

Tabela 11. Avaliação final para os tipos de cimento com a/c 0,7 aos 28 dias de cura

	Absorção água	Resistência a Compressão	Corrosão Acelerada	Avaliação 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

Ao analisar cada critério individualmente constatou-se que em relação à absorção de água os melhores desempenhos entre os tipos de cimento destaca-se o CPIII-40, como identificado com a relação a/c de 0,4 com tempo de cura de 28 dias. Esse resultado deve-se à melhoria da microestrutura do compósito de cimento Portland proporcionada pelo prolongamento do período de cura. E quanto à relação a/c, ela influencia na quantidade de vazios da argamassa, sendo esse um parâmetro que controla a porosidade influenciando nas propriedades ligadas aos mecanismos de transporte no concreto (MENDES et al., 2010).

Já em relação à resistência à compressão confirmou-se, pela Análise Hierárquica, o que é esperado: a resistência à compressão tende a aumentar à medida que diminui a relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Notou-se que, para as amostras de cimento CPIII-40 obteve-se os maiores valores de resistência, devido à própria escória de alto-forno que compõe o material. Pereira (2011) ao realizar a caracterização dos materiais também percebeu que esse tipo de cimento foi o que demonstrou ser mais fino em relação aos outros estudados, o que acarreta em maior reatividade do cimento.

Avaliando os resultados finais dos ensaios de corrosão acelerada percebeu-se novamente que em todas as matrizes analisadas a escolha do melhor tipo de cimento correspondeu ao CPIII-40, seguido do cimento CII-Z-32 e CIIV-32. Isso vem de encontro com as afirmações de Tumidajski e Chan (1996), de que concretos que incorporam escória de alto-forno em substituição parcial do cimento Portland, são mais eficientes em prevenir a penetração de íons cloreto em comparação com concretos dosados com cimentos comuns.

Por fim, constatou-se que para os corpos de prova fabricados com o cimento CPIII-40, que foi escolhido em todas as matrizes analisadas, os valores da relação água/cimento resultaram em efeitos relativamente semelhantes, e a favor da proteção do concreto quanto à corrosão por ataque de cloretos. Em relação à cura, o tempo prolongado também favoreceu o CPIII-40 na proteção do concreto.

Este trabalho foi realizado tendo como base de dados o trabalho de mestrado de Pereira (2011) e deve-se destacar que a aplicação da AHP seria mais completa se o banco de dados compreendesse dados de velocidade de corrosão e até outro indicativo de corrosão de armaduras como ocorrência de manchas de corrosão na superfície do concreto. Porém, este trabalho mostra que a AHP é um sistema aberto à inclusão de outros parâmetros, o que pode enriquecer o resultado da escolha.

## 5. CONCLUSÕES

A aplicação da Análise Hierárquica como uma ferramenta para tomada de decisões apresentou vantagens como facilidade de aplicação do método, e a possibilidade de manipular os fatores determinantes em uma escolha, fornecendo resultados claros e objetivos. O AHP permite a construção de hierarquias que consideram múltiplas variáveis e admitem a comparação e avaliação de critérios priorizando os resultados.

Em relação ao presente trabalho, a aplicação do AHP facilitou a escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto, considerando também diferentes relações água/cimento e tempos de cura.

Avaliando os critérios de escolha, através dos ensaios de absorção de água, resistência à compressão e corrosão acelerada executados por Pereira (2011), constatou-se que o cimento CPIII-40 foi o que apresentou o melhor desempenho em todas as combinações avaliadas neste trabalho. Já de acordo com o tempo de cura o melhor desempenho do cimento escolhido foi aos 28 dias, como esperado devido ao maior grau de hidratação.

É relevante salientar que as importâncias relativas dos critérios considerados foram estabelecidas pelos autores e embasadas na literatura e na dissertação de Pereira (2011). E que a intenção deste trabalho é demonstrar a utilidade e aplicação do AHP, quando envolve uma tomada de decisão entre diversas possibilidades e combinações abrangentes nos estudos de corrosão de armaduras sob ação de íons cloreto no concreto.

Assim, para a presente pesquisa, pode-se afirmar que a Análise Hierárquica demonstrou-se eficiente para a sistematização de escolhas e para uma nova análise dos resultados obtidos na dissertação de Pereira (2011). As variáveis a serem consideradas e seus respectivos pesos podem ser discutidas em trabalhos futuros, visando aprimorar o método desenvolvido neste trabalho. Um ponto de melhora que já poderia ser sugerido no método é implementar na AHP algum parâmetro que considere a velocidade de corrosão.

## 6. REFERÊNCIAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: Cimento Portland - determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

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

CERVO, T. C. *Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.

COSTA, H. G. *Introdução ao Método de Análise Hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão*. 1 ed. Niterói, 2002.

DOTTO, J. MR. *Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto como e sem pozolana*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; SACIOTO, 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. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São 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. Aplicação do método de AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos 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. Análise hierárquica para escolha entre agregado natural ou areia de britagem de rocha para confecção 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. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F.; BALBINOT, G. B.; HELENE, P.. Inspeção em prédios no Rio de Janeiro: corrosão em pilares. *Concreto & Construção*, 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 corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, v. 2, p. 102-112, 2013.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MENDES, M. V. A. da Silva; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; FERREIRA, R. B. Avaliação das propriedades de transporte massa em concretos contendo adições 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. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. 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 corrosion 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 influência do tipo de cimento em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Construção 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 aplicação de análise hierárquica. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 3, p. 125-134, 2012.
- PEREIRA, E.; RESENDE, A.; MEDEIROS, M. H. F.; MENEGUETTI, L. C. Ensaio acelerado por cloretos: efeito da sílica ativa, relação água/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. Análise hierárquica para a escolha 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 corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação a/c, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção 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 corrosion 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 seleção de caminhões coletores-compactadores de resíduos sólidos. *Acta Scientiarum Technology*, v. 33, n. 3, p. 259-264, 2011.
- TESSARI, R. *Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloreto*. Dissertação (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 e físico-mecánica de cementos con adiciones de filler calcáreo na Venezuela

H. Bolognini<sup>1</sup>, N. Martínez<sup>1</sup>, O. Troconis de Rincón<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Capítulo Venezuela, [hbolognini@ucla.edu.ve](mailto:hbolognini@ucla.edu.ve)

<sup>2</sup> Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, Centro de Estudios de Corrosión [oladis1@yahoo.com](mailto: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.

### 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 cementos 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 cementos 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.

### 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.

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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, na Venezuela, tem-se apresentado uma crise sobre a demanda, comercialização e produção do cimento, um dos principais materiais de construção, especificação para a fabricação de concreto. Este fato levou os fabricantes a buscar alternativas para atender esta demanda crescente, sendo então incluída a oferta comercial dos materiais denominados cimentos com adições, sendo estes do tipo Portland com adições de calcário, cuja concentração varia entre 15 e 30% em relação ao peso do cimento.

Embora a produção de cimentos com adições seja um fenômeno mundial que busca, entre outras coisas, reduzir o impacto ambiental da produção de cimento Portland e diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> na indústria da construção, na Venezuela se tem evidenciado o uso indiscriminado deste material, uma vez que não são consideradas as limitações técnicas destes tipos de cimentos, fundamentalmente no que se refere à resistência mecânica e o seu comportamento frente à corrosão das armaduras. Este último item conduziu a hipótese deste trabalho, sobre a base da composição química destes cimentos, que não proporciona somente uma menor reserva alcalina, tornando-os menos resistentes às ações dos agentes ambientais, especificamente à carbonatação, mas a sua incapacidade de garantir resistências mecânicas adequadas para traços convencionais.

Os cimentos com adições (ou compostos) são misturas de clínquer de cimento Portland, sulfato de cálcio (gesso) e adições. Estes cimentos podem ser produzidos através da moagem conjunta destes componentes ou pela mistura destes componentes finamente moídos (Salamanca, 2000). Os cimentos compostos do tipo CPCA 1 e CPCA 2 foram formulados para serem empregados na produção de concretos e argamassas que demandam uma melhoria em sua trabalhabilidade, capacidade de retenção de água, resistências adequadas ao seu uso e maior durabilidade (Salamanca, 2000). De acordo com a norma Venezuelana COVENIN (COVENIN 3134-2004/ASTM C-150), o CPCA 1 é aquele cuja quantidade de calcário ou de outro material calcário é igual ou inferior a 15% do peso total. Enquanto o CPCA 2 apresenta uma quantidade de calcário ou outro material calcário superior a 15% e igual ou inferior a 30% do peso total.

Conforme mencionado, é de grande importância conhecer a natureza e as características físico-mecânicas destes cimentos, uma vez que depende das mesmas alcançar as condições para o uso como concreto estrutural que garantam um concreto forte e durável. Os problemas observados pelo uso inadequado de concretos elaborados com distintos tipos de cimentos, sem que sejam tomadas as devidas medidas de prevenção, torna necessário o aprofundamento no conhecimento dos materiais a utilizar e nos produtos de processamento gerados na fabricação dos concretos.

A norma venezuelana não estabelece condições particulares para as características dos cimentos com adição de calcário, e não regulamenta os seus requisitos químicos, como é feito com um cimento Portland normalizado. Para os cimentos compostos, a norma COVENIN 3134-04/ASTM C-150 estabelece os requisitos físicos, químicos e mecânicos mínimos a serem atendidos, exigindo como requisitos físico-químicos os mesmos estabelecidos para o cimento Portland tipo I e com referência aos requisitos químicos, apenas três parâmetros, entre os quais se encontram a perda ao fogo, resíduos insolúveis e quantidade de enxofre (SO<sub>3</sub>). Porém, estes componentes não são os únicos que garantem a qualidade do cimento. Por esta razão, é adequado aplicar, para cimentos compostos existentes, parâmetros químicos existentes na norma vigente COVENIN 109-90/ASTM C-114, a qual contempla os métodos de ensaio que se empregam para se efetuar as análises químicas de cimentos hidráulicos, fundamentais para a determinação dos principais componentes químicos através do método de Bogue: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, aluminato ferritotetracálcico. Contudo, se faz necessária e urgente a determinação das limitações técnicas sobre o uso destes cimentos na fabricação de concretos para elementos estruturais, a qual

certamente contribuirá para melhoria da durabilidade das edificações do país. Desta forma, este artigo visa a determinação das características químicas e físico-mecânicas dos cimentos compostos das diversas empresas que fabricam este material na Venezuela, que permitam estimar o seu comportamento como concreto estrutural.

## **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Os materiais utilizados foram os seguintes: Cimento Portland Tipo I, Cimento com adição de fíler calcário CPCA de seis empresas distintas do país (identificadas como CEMA, CEMCA, CEMCO, CEMLI, CEMVEN e CEMMA), areia silicosa de acordo com a norma venezuelana COVENIN 2503/ASTM C-778. Para o estudo de traço foi adotada as recomendações do ACI 211.

Para a avaliação das propriedades químicas e físico-mecânicas, foram utilizados os critérios de validação para cimentos compostos descritos na Norma COVENIN 3134-04 (ASTM C-150), mediante os seguintes ensaios: análise química (COVENIN 109-90/ASTM C-114); finura Blaine (COVENIN 487/ASTM C-204); tempo de pega (COVENIN 493:1992/ASTM C-191) e resistência à compressão (COVENIN 484:1993/ASTM C-109). Em relação ao número de amostras em cada ensaio, foi utilizada, no mínimo, a quantidade estabelecida em cada norma.

Para a análise química dos cimentos compostos, a norma COVENIN 109-90/ASTM C-114 estabelece que devem ser utilizados recipientes de platina. Uma das limitações deste trabalho foi a indisponibilidade destes recipientes, onde foi decidido trabalhar com recipientes cerâmicos convencionais com uma capacidade entre 15cm<sup>3</sup> e 30cm<sup>3</sup>.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1. Caracterização físico-mecânica do cimento composto CPCA**

Apresentam-se os resultados mais relevantes da caracterização físico-mecânica realizada nas seis marcas de cimentos comercializadas do tipo CPCA, fabricadas na Venezuela.

Na tabela 1 se mostram os resultados médios da finura obtida com o permeabilímetro de Blaine, de seis amostras para cada tipo de cimento ensaiado, em relação à finura de um cimento normalizado. Nesta tabela se observa que em todos os casos avaliados, os valores de finura determinados dos cimentos Portland compostos CPCA superam o valor mínimo estabelecido pela norma (3000 cm<sup>2</sup>/g); que também indica uma maior área superficial do que a mínima efetivamente necessária para a hidratação.

É importante ressaltar que uma das últimas etapas da fabricação do cimento é a mistura do clínquer moído com o sulfato de cálcio hidratado. Uma vez que a hidratação começa na superfície dos grãos de cimento, sua área superficial constitui o principal acesso para as reações de hidratação. Deste modo, a velocidade da hidratação depende da finura das partículas de cimento, portanto, para uma evolução rápida da resistência, é necessário um alto grau de finura. Entretanto, a moagem das partículas de cimento visando a obtenção de uma maior finura representa um custo considerável. O que se requer é que o cimento alcance suas resistências adequadas, a idades distintas, através da alta qualidade do clínquer mais do que pela sua finura de moagem.

Tabela 1. Resultados da determinação da Finura (superfície específica dos cimentos Portland compostos CPCA, valor normativo (mínimo) de 3000 cm<sup>2</sup>/g

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

Cabe destacar que na Venezuela os cimentos usuais são moídos a uma finura Blaine da ordem de 2800 a 3500cm<sup>2</sup>/g. Quando ultrapassam os 4000cm<sup>2</sup>/g, e dependendo da composição química do cimento, o concreto pode apresentar problemas secundários, como dificuldades na sua mistura e maior retração. De modo que estes resultados são considerados como aceitáveis, devido ao fato de que os valores obtidos nos cimentos Portland compostos CPCA deste estudo superam o mínimo estabelecido na norma COVENIN 3134:2004, porém não excedem os valores de finura considerados inadequados (>4000cm<sup>2</sup>/g).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados médios de nove amostras de cada tipo de cimento ensaiado, obtidos através da determinação do tempo de início e fim de pega da pasta de cimento. Com é bem conhecido, o tempo de pega é aquele no qual um aglomerante altera sua plasticidade inicial a um estado pétreo, sendo esta uma propriedade fundamental para este tipo de material, a qual estabelece o tempo médio de trabalhabilidade e lançamento, sem afetar o desenvolvimento de suas propriedades finais. Observa-se nesta tabela que para os cimentos Portland composto CPCA, em todos os casos avaliados, os valores de tempo de pega inicial mínimos determinados não atingem o valor normativo estabelecido. Isto resulta na não conformidade desta característica do material, acarretando potenciais dificuldades na elaboração de concretos e argamassas devido ao curto tempo de pega determinado. Por outro lado, o comportamento do cimento Portland Tipo I apresentou resultados de acordo com o esperado.

Embora as características anteriormente mencionadas reflitam de alguma forma para que o cimento avaliado apresente discrepâncias em relação aos valores normativos a serem satisfeitos, na prática construtiva a qualidade de um cimento é medida com base na sua resistência à compressão, desenvolvida no seu estado endurecido, sendo esta característica mecânica o principal fator de avaliação do aglomerante. Portanto, esta propriedade foi avaliada nos cimentos estudados, sendo confeccionados 18 corpos de prova cúbicos de argamassa cimentícia (cimento a avaliar e areia silicosa normalizada) de 50,8mm de lado, para cada tipo de cimento e para cada idade de ensaio (7 e 28 dias).

Tabela 2. Resultados da caracterização dos cimentos Portland compostos CPCA, determinação do tempo de pega.

<b>DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO</b>				
<b>DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PEGA</b>				
<b>Cemento Cimento</b>	<b>Tiempo Tempo Inicial (min)</b>	<b>Tiempo Tempo Final (min)</b>	<b>Valor Normativo</b>	
			<b>Tiempo Inicial mínimo (min)</b>	<b>Tiempo Final máximo (min)</b>
<b>CEMA</b>	30	255	45	480
<b>CEMCA</b>	30	165	45	480
<b>CEMCO</b>	40	180	45	480
<b>CEMLI</b>	40	165	45	480
<b>CEMVN</b>	15	240	45	480
<b>CEMMA</b>	15	240	45	480
<b>PORTLAND I</b>	90	290	45	480

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados obtidos de resistência à compressão que confirmam a não conformidade com as normas pertinentes.

Tabela 3. Resistência à compressão de cimentos Portland compostos CPCA, 7 e 28 dias.

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CEMENTOS CON ADICIONES CPCA</b>							
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CIMENTOS COMPOSTOS CPCA (kg/cm<sup>2</sup>)</b>							
<b>Cemento Días Cimento Días</b>	<b>CEMAN</b>	<b>CEMCA</b>	<b>CEMCO</b>	<b>CEMLI</b>	<b>CEMVE</b>	<b>CEMMA</b>	<b>PORTLAND I</b>
<b>7 días días (Promedio) Média</b>	117,73	149,06	46,29	93,06	127,75	132,89	296,63
<b>Desviación Desvio padrão</b>	+/- 4,50	+/- 4,00	+/- 7,76	+/- 3,88	+/- 4,83	+/- 3,43	+/- 3,21
<b>28 días días (Promedio) Média</b>	145,12	213,45	178,45	176,87	216,85	157,77	394,08
<b>desviación Desvio padrão</b>	+/- 5,03	+/- 4,07	+/- 4,83	+/- 3,76	+/- 4,14	+/- 4,73	+/- 4,03

Observando os resultados obtidos, é evidente que a resistência média mais baixa aos 7 dias foi obtida com o cimento CEMCO, com um valor de 46,29 kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto a mais alta foi obtida com o cimento CEMCA (149,06 kgf/cm<sup>2</sup>). Entretanto, nenhum dos cimentos avaliados atingiram 170 kgf/cm<sup>2</sup>, valor recomendado pela norma COVENIN 3134:2004/ASTM C-150 para os cimentos Portland compostos CPCA I. Um comportamento semelhante foi observado ao avaliar a resistência à compressão aos 28 dias, onde nenhum dos cimentos avaliados alcançou o valor de 280 kgf/cm<sup>2</sup>, superado apenas pelo cimento Portland de referência Tipo I. Este fato, sem dúvida, compromete o seu desempenho no concreto estrutural. Se partirmos da premissa de que o material não apresenta as condições mínimas, a sua evolução não deve atingir os valores esperados. Por este motivo, foi

considerado caracterizá-los quimicamente, para assim determinar os compostos que estariam contribuindo para que os mesmos não alcancem altas resistências à compressão.

### 3.2. Caracterização química dos componentes majoritários e minoritários dos cimentos compostos CPCA

#### 3.2.1 Principais componentes de cimentos compostos

**Dióxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ):** Este ensaio foi realizado através da calcinação dupla da amostra, e o resíduo deste estudo foi utilizado posteriormente na determinação do grupo dos hidróxidos de amônio. A Figura 1 apresenta os valores médios dos resultados obtidos.

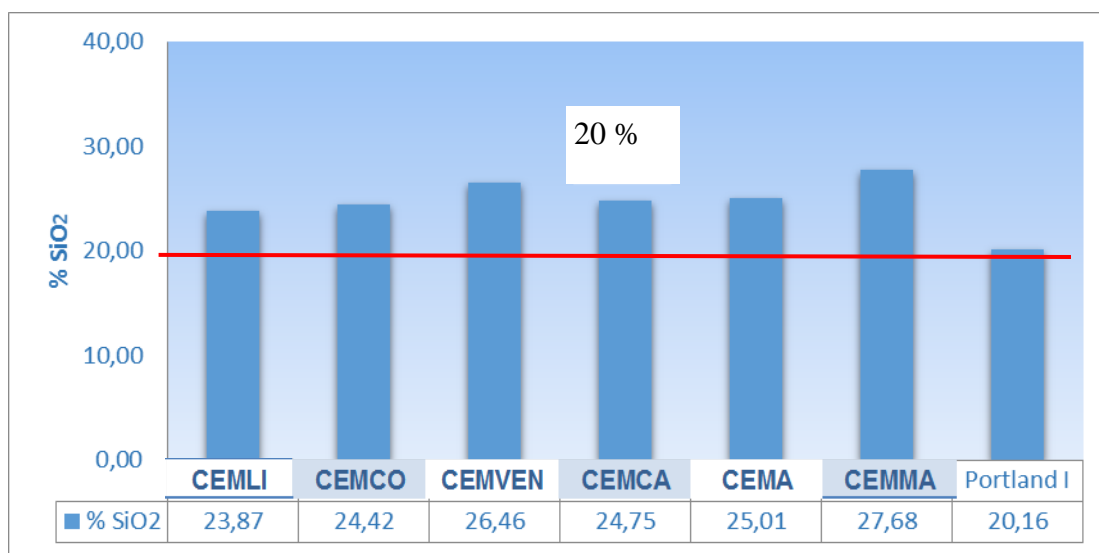


Figura 1. Porcentagem de  $\text{SiO}_2$  dos diferentes tipos de cimentos avaliados

Os valores obtidos indicam que o cimento Portland I apresentou um valor de 20,16% e todas as outras amostras mais de 20% de dióxido de silício, que é o parâmetro adotado como mínimo pela norma COVENIN 28-93/ASTM C-150 para o cimento Portland tipo II, já que a norma não especifica a quantidade deste componente para os cimentos Portland Tipo I. Todos os valores se encontram num intervalo entre 20% e 30%, sendo o cimento Portland Tipo I o de menor porcentagem.

**Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ):** Nesta determinação, como indica a norma COVENIN 109-90/ASTM C-114, é subtraído do valor obtido no estudo do hidróxido de amônia a quantidade de óxido férrico. Todos os ensaios realizados cumpriram com o parâmetro de variação permitido pela norma para assegurar a confiabilidade do ensaio. Os resultados totais de % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se apresentam na Figura 2.

Os resultados obtidos indicam que todas as amostras estão acima do valor permitido pela norma de cimentos Portland tipo II, a qual estabelece um limite inferior a 6%. As amostras de cimento Portland tipo I e CEMLI apresentam 6,8% e 8,3%, respectivamente, que os valores mais próximos do limite estabelecido. Por sua vez, os cimentos CEMCO e CEMVEN são os que possuem a maior porcentagem de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20,15% e 19,96%, respectivamente). Porrero (2004) ressalta que os valores deste parâmetro para os cimentos Portland estão entre 3,5% e 8%, em que os cimentos compostos excedem esse parâmetro.

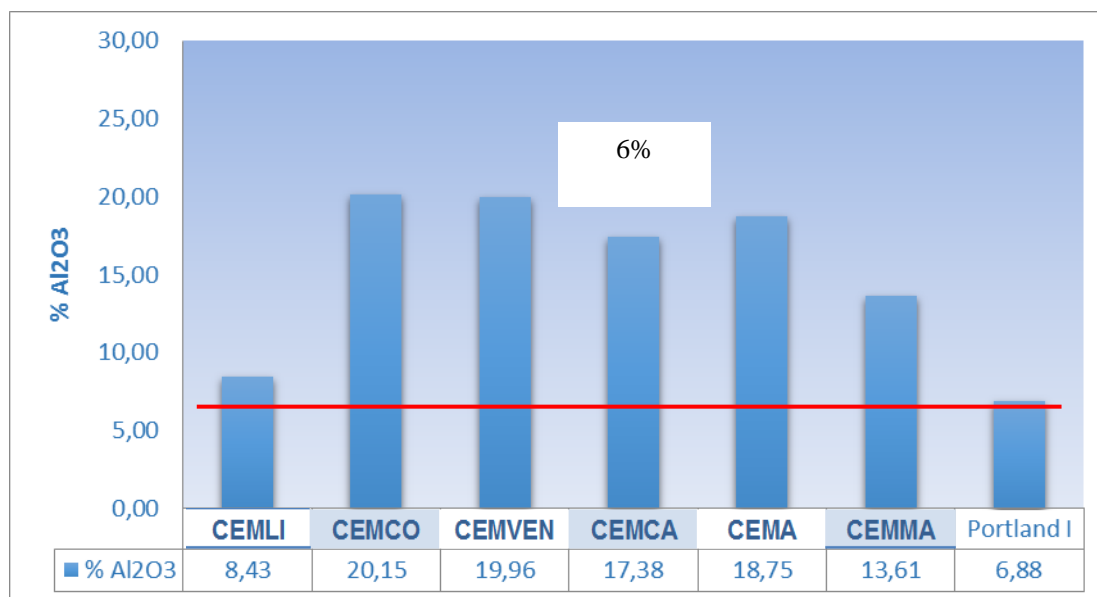


Figura 2. Porcentagem de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos diferentes cimentos avaliados.

**Óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** As porcentagens de óxido férrico para cada uma das amostras estudadas estão detalhadas na Figura 3. Todas as amostras analisadas se encontram abaixo do limite estabelecido na norma COVENIN 28-93/ASTM C-150, sendo a amostra de cimento CEMA a que apresentou a maior porcentagem de óxido férrico, 5,10%, e a amostra de cimento CEMLI a que apresentou a menor porcentagem deste componente, 3,18%.

**Óxido de Cálcio (CaO):** Os resultados do ensaio se apresentaram, em conformidade com a norma COVENIN 109-90. A Figura 4 apresenta os resultados de % de óxido de cálcio obtidos.

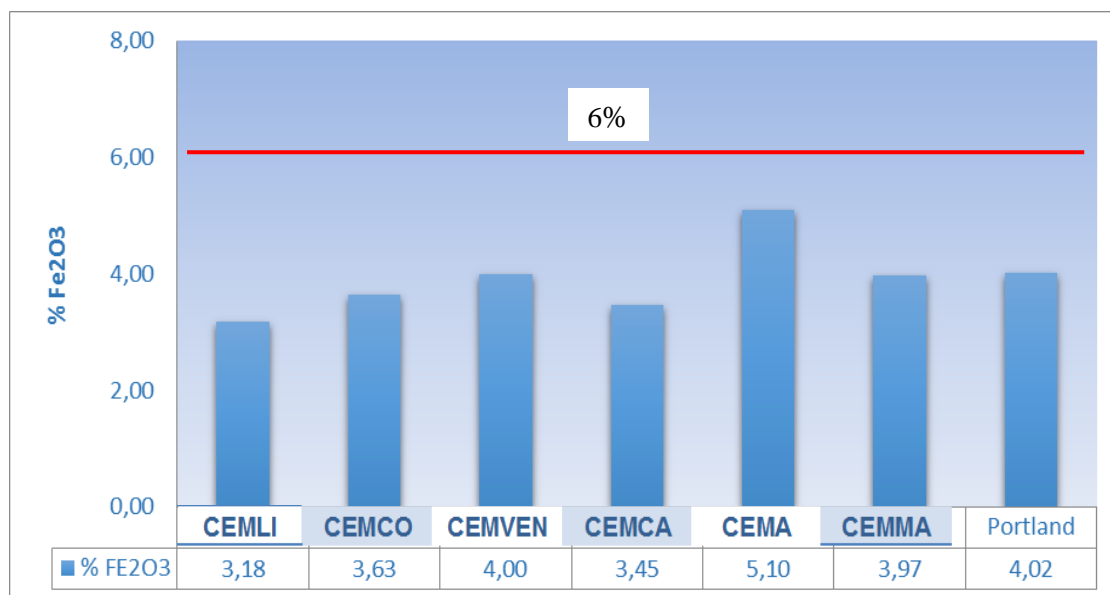


Figura 3. Porcentagem de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos diferentes cimentos avaliados.

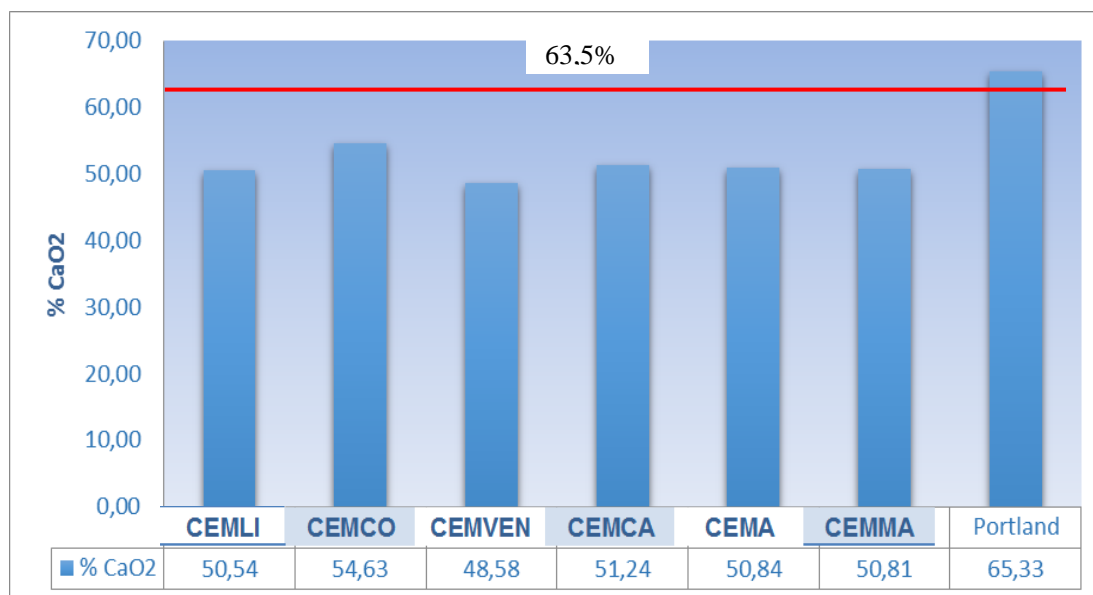


Figura 4. Porcentagem de CaO nos diferentes cimentos avaliados.

Este ensaio não possui um valor normalizado para comparação, entretanto Porrero (2004) indica valores entre 60% e 67% de CaO para cimentos Portland tipo I de excelente qualidade, estando os cimentos compostos avaliados abaixo destes valores, ente 48,58% e 54,63%.

**Óxido de Magnésio (MgO):** Este ensaio é feito com os resíduos da filtragem da determinação de Óxido de Cálcio, obtitendo-se os valores apresentados na Figura 5.

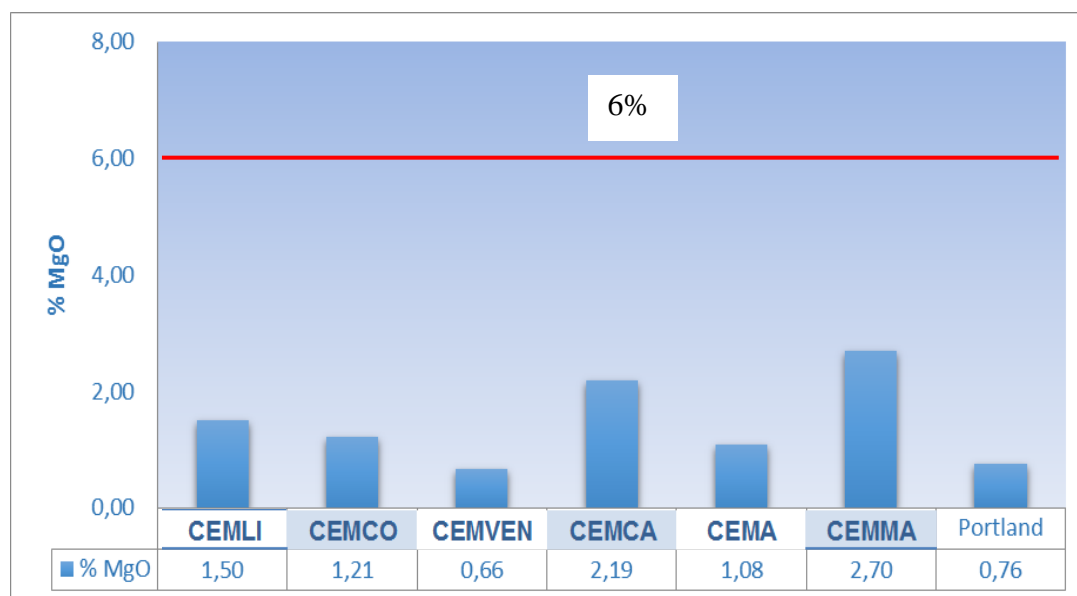


Figura 5. Porcentagem de MgO nos diferentes cimentos avaliados.

Todos os valores se encontram abaixo do limite de 6%, estabelecido na norma COVENIN 109-90/ASTM C-114. Observa-se que as porcentagens de Óxido de Magnésio estão compreendidas entre 0,66% para as amostras de CEMVEN e 2,7% para as amostras de CENMA.



**Trióxido de Azufre (SO<sub>3</sub>):** Os resultados obtidos para as amostras podem ser observados na Figura 6.

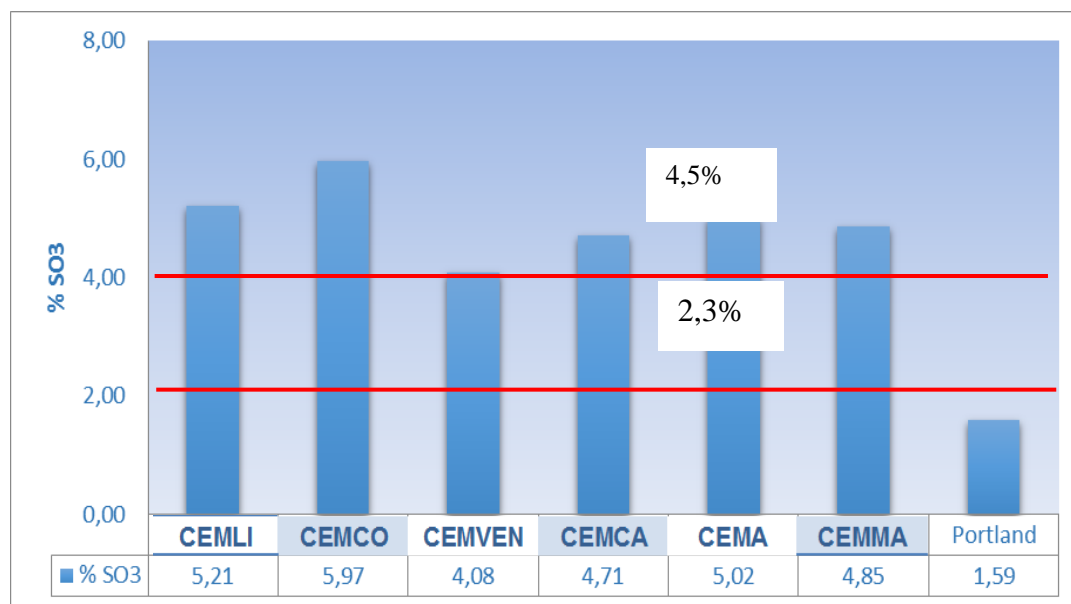


Figura 6. Porcentagem de SO<sub>3</sub> nos diferentes cimentos avaliados.

Os requisitos químicos estabelecidos na norma COVENIN 28-93/ASTM C-150 estipulam a porcentagem de Trióxido de Azufre presente nos cimentos tipo Portland como inferior a um intervalo entre 2,3% e 4,5%. A Figura 6 mostra que somente o CEMVEN (4,08%) e o Portland (1,59%) estão de acordo com esta norma, visto que as demais amostras apresentam maiores porcentagens, entre 4,85% e 5,97%.

### 3.2.2 Ensaio especiais

**Perda ao Fogo (PF) do cimento:** Este ensaio se mostrou um dos mais simples de realizar, pois envolve somente a calcinação da amostra a 950°C, seguida pelo cálculo da diferença de peso. A Figura 7 apresenta as porcentagens de perda ao fogo obtidas no ensaio.

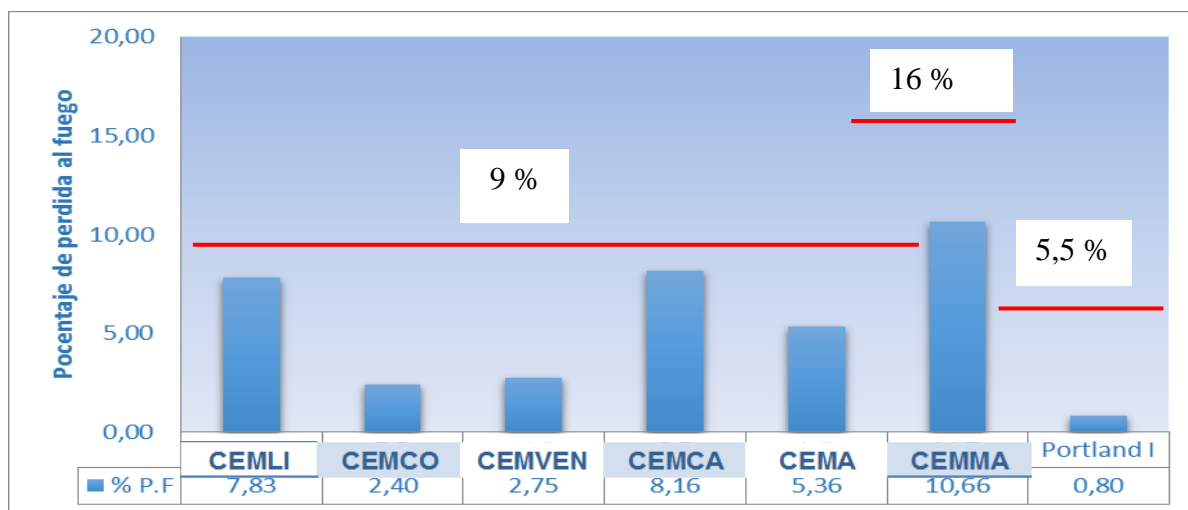


Figura 7. Porcentagem de perda ao fogo dos diferentes cimentos avaliados.

Todas as amostras analisadas atenderam aos parâmetros estabelecidos nas normas COVENIN. Para os cimentos CPCA1, os valores devem ser inferiores a 9%, para o CPCA2 inferiores a 16% e para os cimentos Portland tipo I inferiores a 5,5%. Os cimentos CEMLI e CEMCA, com 7,83% e 8,16%, respectivamente, apresentam as maiores porcentagens de PF em relação às demais amostras.

### 3.2.3 Componentes menores

**Óxido de Sódio (Na<sub>2</sub>O) e Óxido de Potásio (K<sub>2</sub>O)** – Para a determinação destes componentes, foi realizada em todas as amostras uma diluição de 1:10 para possibilitar a leitura na reta de calibração do fotômetro de chama. A curva de calibração para estas determinações pode ser observada na Figura 8.

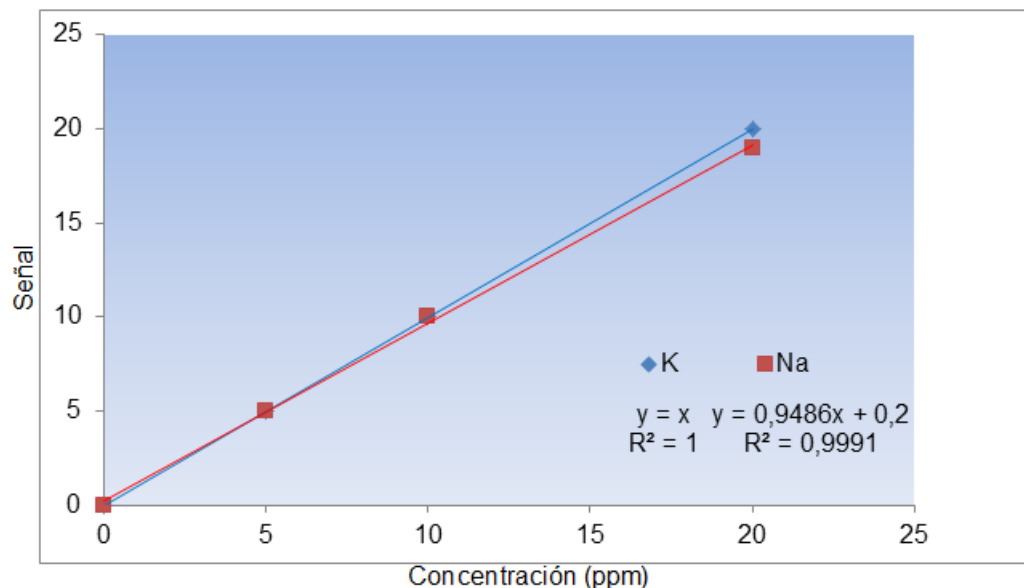


Figura 8. Curva de calibração para a determinação do Na e do K nos diferentes cimentos avaliados.

Como se observa na Figura 8, tanto o Na como o K apresentam um excelente comportamento linear. Os resultados obtidos (Tabela 4) para os valores limites das amostras indicam que todas as concentrações de Na estão abaixo do desvio máximo admitido, que é de 0,03%. Em relação ao K, 72% dos resultados se encontram abaixo de 0,03%, que é um valor aceitável, apenas CEMCO e CENMA estão em aparente desacordo, com uma porcentagem de 0,04%, mas também podem ser considerados como conformes com a norma.

A Tabela 4 também indica que a maior % de Na<sub>2</sub>O se encontra no cimento CEMVEN, com 0,17%, e a menor % nos cimentos CEMLI, CEMCO e CEMA, com 0,11%. Por sua vez, o cimento Portland apresenta 0,16%, estando dentro do limite anteriormente mencionado. As maiores porcentagens de K<sub>2</sub>O são observadas nos cimentos CEMVEN e CEMA, com 0,67%, e as menores porcentagens no cimento CEMCO, com 0,31%. Por sua vez, o cimento Portland apresenta 0,52% de K<sub>2</sub>O, estando dentro dos limites anteriormente mencionados.

Tabela 4. Resultados obtidos na determinação de Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O nos diferentes cimentos avaliados.

Muestra Amostra	$\sigma^*Na$	$\sigma^*K$	N.C 109-90**	%Na <sub>2</sub> O***	%K <sub>2</sub> O***
<b>CEMLI</b>	0,00	0,02	0,03	<b>0,11</b>	<b>0,38</b>
<b>CEMCO</b>	0,00	0,04	0,03	<b>0,11</b>	<b>0,31</b>
<b>CEMVEN</b>	0,00	0,00	0,03	<b>0,17</b>	<b>0,67</b>
<b>CEMCA</b>	0,01	0,02	0,03	<b>0,12</b>	<b>0,36</b>
<b>CEMA</b>	0,00	0,00	0,03	<b>0,11</b>	<b>0,67</b>
<b>CEMMA</b>	0,01	0,04	0,03	<b>0,12</b>	<b>0,45</b>
<b>Portland I</b>	0,00	0,00	0,03	<b>0,16</b>	<b>0,51</b>

\* Desvio padrão entre as amostras, \*\* Norma COVENIN 109-90/ASTM C-114, \*\*\* Média aritmética das %.

### 3.2.4 Resíduo Insolúvel (R.I)

No caso deste estudo, mais de 70% dos ensaios realizados nas amostras cumprem com o parâmetro estabelecido na norma COVENIN 109-90/ASTM C-114, já que a variação destes ensaios é inferior a 0,1%, apenas nas amostras de CEMAN e Portland I foram obtidas porcentagens maiores, de 0,12% e 0,15%, respectivamente. A Figura 9 apresenta estes resultados.

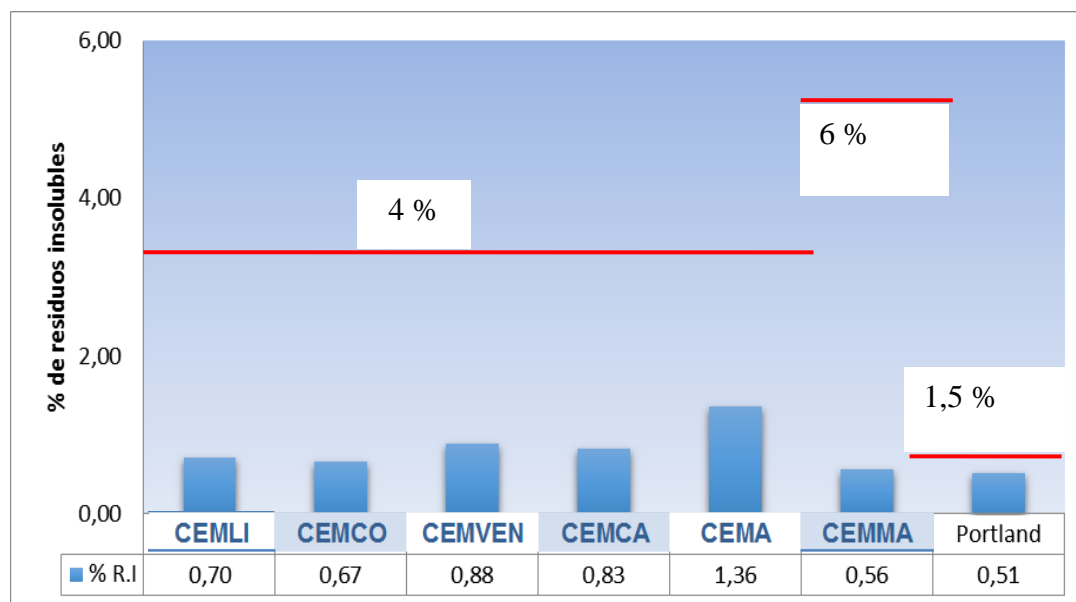


Figura 9. Porcentagem de resíduos insolúveis nos diferentes cimentos avaliados.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que todas as amostras cumprem com os parâmetros estabelecidos nas normas COVENIN. Em termos de resíduos insolúveis, os cimentos CPCA1 apresentaram porcentagens inferiores a 4%, os CPCA2 porcentagens inferiores a 6% e o cimento Portland tipo I uma porcentagem inferior a 1,5%. Nos resultados pode-se observar que em sua maioria, a % de RI das amostras se encontram abaixo de 1%, com exceção do cimento CEMAN, o qual apresentou % levemente superior a 1%. Como todas as amostras foram comparadas com as

normas COVENIN 3134-04/ASTM C-150, o cimento Portland também atendeu integralmente a todos estes parâmetros.

A Tabela 5 apresenta todos os resultados da caracterização química dos diferentes cimentos avaliados, onde pode-se observar, conforme já mencionado, que as concentrações de alguns destes componentes se encontram em desacordo com os especificados nas normas COVENIN.

É importante destacar as quantidades superiores e inferiores de Óxido de Alumínio e Óxido de Cálcio, respectivamente, na maioria dos cimentos avaliados; nos quais as proporções obtidas resultaram em certos limitantes para seu uso no concreto estrutural, particularmente em relação à resistência à compressão, a qual em todos os casos se apresentou inferior à obtida nas amostras de referência (cimento Portland I). A baixa porcentagem de CaO não permite a formação de C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S em quantidade suficiente para desenvolver uma resistência à compressão igual ou superior à obtida com o cimento Portland I.

Tabela 5. Características químicas dos cimentos compostos CPCA1 e CPCA2

Muestra Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.F	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> 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

Além disso, a alta porcentagem de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está relacionada com o baixo tempo de pega obtido nos diferentes cimentos compostos, devido a potencial formação de altas quantidades de C<sub>3</sub>A; o que também aumenta a susceptibilidade ao ataque de sulfato, o que é muito importante em construções em ambientes marinhos.

Finalmente, é importante destacar que parece ser contraditório que as normas exijam aos cimentos compostos requisitos físico-mecânicos similares aos do cimento Portland I, quando sua composição química difere sensivelmente, como se demonstra nos resultados deste artigo.

#### 4. CONCLUSÕES

1. Os cimentos compostos tipo CPCA fabricados na Venezuela e analisados neste artigo não atendem aos requisitos mínimos estabelecidos na norma venezuelana para seu uso no concreto estrutural.
2. O uso destes cimentos na elaboração de concretos estruturais poderá resultar em manifestações patológicas prematuras.
3. As quantidades de óxido de alumínio, óxido de cálcio e trióxido de enxofre dos cimentos compostos estão em desconformidade com o especificado nas normas.
4. As porcentagens de adição empregadas na fabricação destes cimentos afetam diretamente suas propriedades.
5. Os resultados obtidos sobre a determinação de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem estar relacionados com os resultados de tempo de pega.

## 5. REFERÊNCIAS

- 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, Zuñiga 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.



## Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes

L. Y. Gómez-Zamorano<sup>1</sup>, G. García-Guillén<sup>1</sup>, J. L. Acevedo-Dávila<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad 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.gomezzm@uanl.edu.mx](mailto:lauren.gomezzm@uanl.edu.mx)

<sup>2</sup>Corporación 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](mailto:alconpat_int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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

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 pozolânica e elevou-se a resistência à compressão.

**Palavras chave:** Reatividade, materiais cimentícios complementares.

## 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 pozolánica 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.

Autor de correspondencia: Lauren Y. Gómez-Zamorano

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, grande parte das pesquisas científicas e tecnológicas está focada no desenvolvimento sustentável. Isto envolve o desenvolvimento de novos materiais que são considerados como “amigos” do meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental durante os processos de obtenção, transporte, produção, aplicação e reciclagem dos mesmos. Um dos setores industriais mais preocupados em reduzir esse impacto é o da construção, em especial a indústria cimenteira. O processo de fabricação do cimento requer uma grande quantidade de energia térmica e elétrica, além de demandar uma enorme quantidade de matéria prima não renovável, tal como o uso de calcário, argila e combustíveis fósseis, necessário à produção de clínquer. Este processo emite grandes quantidades de CO<sub>2</sub> (827 kg CO<sub>2</sub>/t de clínquer) e outros gases (como SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>), que causam um grande impacto ambiental e contribuem com o aquecimento global.

A produção de cimento Portland (CP) é responsável pela emissão de 5% a 8% do CO<sub>2</sub> mundial [Cembureau (2014), Damtoft et al (2008), Schneider et al (2011)]; de maneira que o aumento da demanda de cimento e o impacto ambiental que implica o seu processo de fabricação tornou necessária a opção pelo uso de materiais e tecnologias alternativos. Durante os últimos anos têm sido utilizados materiais cimentícios complementares (MCC) como as escórias de alto forno do processo siderúrgico (EGAH), as cinzas volantes (CV) da queima de carvão em usinas de energia, assim como pozolanas naturais ou artificiais e calcário para a produção de cimentos compostos. É possível empregar diferentes tipos de materiais que substituam parcialmente o cimento Portland, mas o efeito de cada um deles separadamente no processo de hidratação do cimento ainda está sob investigação e o efeito que dois ou mais constituintes tem sobre as reações estão sob constante estudo [Juenger y Siddique (2015)].

A quantidade de adições, a composição química, a fração amorfa, a atividade pozolânica ou hidráulica, o tamanho da partícula e a morfologia de cada material são algumas das variáveis a serem levadas em conta ao se elaborar traços com cimentos compostos com mais de um material de substituição [Juenger y Siddique (2015)]. É importante destacar que o desenvolvimento das propriedades mecânicas das pastas de cimento composto está diretamente relacionado com o efeito das adições no processo de hidratação das pastas de cimento. Para um cimento composto, o mecanismo de hidratação envolve a participação de muitos componentes na reação que ocorre no estado endurecido. Adicionalmente, Bentz et al (2011) concluíram que, para os cimentos binários, além de alterar a distribuição das partículas do material cimentício, as adições aumentam sua densificação. Yun et al (2013) destacam que para argamassas com 60% de EGAH, as propriedades mecânicas aumentaram com a fração amorfa da mesma. Sharfuddin et al (2008) observaram que a adição de sílica ativa (HS) reduziu a permeabilidade do concreto, devido a redução da porosidade e a densificação da matriz causada pela reação pozolânica.

Porém, o uso combinado de CV e HS produz uma maior porosidade na matriz cimentícia, provavelmente causada pela rápida reação da HS. Desta maneira, a HS deve ser mantida, no máximo, em 10% do peso de material cimentício. A adição conjunta de HS e EGAH reduziu a resistência do concreto. Além disso, de acordo com Ali et al. (2014), o tipo de adição modifica a morfologia da etringita e, conseqüentemente, o calor de hidratação. Ping et al. (2013) analisaram a quantidade de hidróxido de cálcio (HC) em cimentos com 40% de CV e 20% de EGAH, onde constataram uma diminuição de 65% em relação ao cimento Portland (CP) puro, devido às reações pozolânica e hidráulicas. Schöler et al. (2015) concluíram que os tipos de hidratos observados nos sistemas com 50% de substituição por MCC são similares àqueles formados no CP puro, com uma redução na quantidade de CH e um aumento no C-S-H e nas fases AFm. Porém, se a CV tem uma fração amorfa relativamente pequena, sua reatividade diminuirá e, portanto, a quantidade de

produtos formados e a resistência à compressão. Cabe ressaltar que os autores mencionam adições de até 30% de CV não reduzem de forma significativa a resistência à compressão.

Janotka et al. (2010) analisaram o efeito de diferentes tipos de metacaulim (MK) nas propriedades mecânicas das pastas parcialmente substituídas e destacaram que ao aumentar o nível de substituição por MK, a resistência à compressão (RC) das pastas de cimento diminuiu. Snelson et al. (2008) utilizaram MK e CV em substituição do CP para investigar o efeito na evolução do calor liberado. O processo de hidratação das pastas de CP com substituição parcial por CV foi alterado de acordo com a porcentagem de substituição, pois com o aumento da porcentagem de substituição houve a diminuição do calor de hidratação. Adições como a CV, MK e SA melhoram o desempenho das pastas de CP, argamassas e concreto, porém tendem a reduzir a trabalhabilidade das misturas. A razão mais comum é que as partículas finas das adições têm maior área superficial e, portanto, a demanda por água para elaborar uma mistura aumenta. Diversos autores [Mansour et al. (2010); Esteves et al. (2010)] demonstraram que ao adicionar SA, CV e MK, a demanda de água aumenta, de maneira que, para se alcançar uma melhor trabalhabilidade, foram adotados aditivos químicos superplastificantes (SP).

Desta forma, este artigo apresenta uma pesquisa sobre o desenvolvimento de tecnologias e materiais sustentáveis para o setor da construção, através da avaliação do comportamento de adições em pastas de cimento e da análise dos resultados, de modo a proporcionar os parâmetros que tornam possível a substituição parcial de cimento Portland. Destaca-se que este artigo contribui de forma importante ao entendimento do efeito de diversos materiais sobre a cinética de hidratação do cimento, o qual está sendo estudado por diversos pesquisadores ao redor do mundo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: (a) cimento Portland da Cemex México, (b) escória granulada de alto forno (da AHMSA e com 97% de fração amorfa), (c) cinza volante tipo F (Comisión Federal de Electricidad – México), (d) metacaulim (obtido através da calcinação no minério de caulim a 700°C, com um tamanho de partícula inferior a 75 micras), (e) sílica ativa (descondensada por moagem mecânica) e (f) dois aditivos superplastificantes base éter policarboxilato. A composição química e a área superficial destes componentes estão apresentadas na tabela 1.

Os padrões de DRX da matéria prima estão apresentados na figura 1. Inicialmente, os materiais em pó foram homogeneizados durante 5 minutos, para que as partículas fossem distribuídas uniformemente, em seguida foi adicionado um quarto da água com aditivo; quando se formaram os primeiros aglomerados, os materiais foram misturados na segunda velocidade por 3 minutos, onde pouco a pouco se adicionou o restante da água. Quando a trabalhabilidade adequada foi obtida, a mistura foi mantida por mais um minuto e então foram moldados os corpos de prova cúbicos de 5cm de aresta. Visando a saída do ar incorporado durante a mistura dos materiais, os moldes cúbicos foram vibrados durante um minuto e subsequentemente foram encaminhados para cura em câmara a 25°C e 100% de umidade. Após 24h, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em solução de hidróxido de cálcio (visando evitar a sua lixiviação) por 1, 3, 7, 14, 28 e 60 dias. Foram preparadas diversas pastas de cimento puro com 10% de substituição por cinza volante, diferentes porcentagens (25% a 45%) de escória granulada de alto forno, de 5% a 15% de metacaulim e de 5% a 10% de sílica ativa. Os traços foram elaborados com uma relação água/sólidos de 0,4 e com 0,3% de aditivo superplastificante em relação ao peso de cimento.



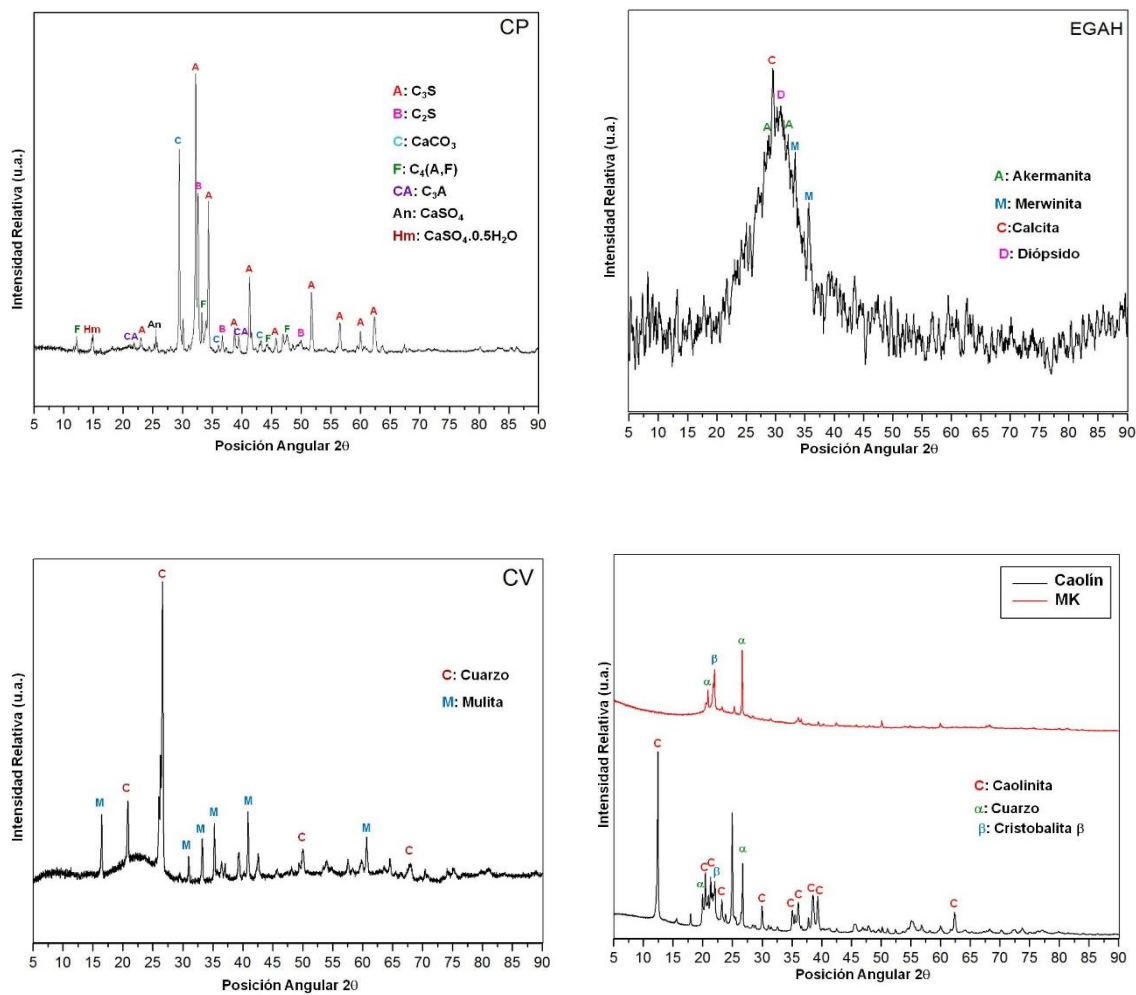


Figura 1. Padrões de difração de raios-X da matéria-prima.

Tabela 1. Composição química em porcentagem de óxidos dos materiais base e área superficial (BET) dos materiais empregados

	CP	EGAH	CV	MK
<b>SiO<sub>2</sub></b>	18.69	38.01	61.17	56.97
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.73	9.98	25.14	35.46
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.17	1.85	4.56	1.02
<b>CaO</b>	63.46	34.32	2.42	1.45
<b>MgO</b>	1.78	10.04	0.85	0.03
<b>SO<sub>3</sub></b>	4.21	2.18	0.18	1.01
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.27	0.49	0.27	0.13
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.67	0.58	1.41	0.54
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.21	1.21	0.99	1.08
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.13	0.00	0.00	0.20
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.07	1.03	0.01	0.00
<b>LOI</b>	3.73	0.34	3.02	2.17
<b>Total</b>	100.12	100.13	100.02	100.06
<b>BET* (m<sup>2</sup>/kg)</b>	511	491	432	573

\* Área superficial

As amostras foram caracterizadas a partir da sua resistência à compressão (RC), posteriormente frações sólidas das amostras foram submergidas em acetona e secas a vácuo a 50°C durante 24h, a fim de suspender as reações de hidratação e analisá-las através da difração de raios X (DRX) e calorimetria isotérmica por condução (CIC).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Resistência à compressão.

A Figura 2 apresenta os resultados de todas as amostras analisadas neste estudo. Na Figura 2A se observa que o uso dos aditivos SP1 e SP2 colaborou com o aumento da RC, para todos as idades de cura, resultando em uma RC a 1 e 60 dias de, aproximadamente, 49MPa e 76MPa, para os traços elaborados com o aditivo SP1, e 44MPa e 76MPa para os traços com SP2. Os aditivos superplastificantes base policarboxilato apresentam adsorção eficaz sobre a superfície das partículas de CP, causando uma alta dispersão estérica dos grupos de éter funcionais, resultando no aumento da trabalhabilidade e da resistência à compressão. As pastas de CP elaboradas com o aditivo SP1 apresentaram resistências ligeiramente mais elevadas que as elaboradas com o SP2.

Este resultado se deve à presença do grupo funcional éter que aparece no espectro FTIR do aditivo SP1. Winnefeld et al. (2007) relatam resistências à compressão entre 38,1MPa a 54,6MPa, aos 7 dias de cura, indicando que nas primeiras idades a RC cresce com o aumento do comprimento e da densidade da cadeia lateral dos grupos funcionais éter do superplastificante. A Figura 2B mostra os resultados da RC desenvolvida pelos traços compostos, onde se observa que as pastas 10CV com SP1 e SP2 desenvolveram uma resistência à compressão aos 60 dias superior às pastas compostas 45EGAH e 15MK. Golapan (1993); Isaia et al. (2003); Slanicka S. (1999) destacam que o aumento da RC de pastas de cimento com substituição parcial de CV se deve ao tamanho e morfologia das partículas de cinza volante. Partículas pequenas e esféricas preenchem os vazios e produzem uma matriz mais densa, aumentando assim a atividade pozolânica do material, ocasionando o aumento da RC.

Cabe destacar que esta atividade pozolânica não é imediata, podendo levar de 3 a 7 dias, de modo que a melhoria da RC é afetada a médio prazo, com tempos de cura intermediários. Este efeito também é notado em pastas de cimento com 10% e 15% de CV [Gutteridge et al. (1990)]. As pastas 15MK com ambos os aditivos apresentaram RC a um dia de cura superiores ao CP e aos demais traços compostos. Este comportamento é atribuído à finura do MK. Diversas pesquisas [Mansour et al. (2010), Caldarone et al. (1994); Wild et al. (1996)] demonstram que o uso de MK contribui com o aumento das resistências mecânicas nas primeiras idades devido ao tamanho de suas partículas finas, que densifica a microestrutura das pastas, e à sua forte atividade pozolânica. Khatib et al (1996) analisaram o aumento da resistência de pastas de cimento com 10% de substituição por MK a diferentes tempos de cura e obtiveram as maiores RC aos 14 dias, indicando que a atividade pozolânica do MK alcança seu ponto máximo de reação neste período. Mansour et al. (2010) ainda destaca que para dispersar o MK numa pasta de cimento é necessário o uso de superplastificantes, os quais melhoram a trabalhabilidade, reologia e as propriedades mecânicas das pastas. A pasta de CO com substituição por MK, utilizando o SP2, apresentou RC 10% superiores, aproximadamente, em relação à pasta 15MK com SP1. Os fatores que possivelmente afetaram este comportamento foram a relação água/sólidos, a qualidade do SP e o efeito de dispersão provocado pelo aditivo.

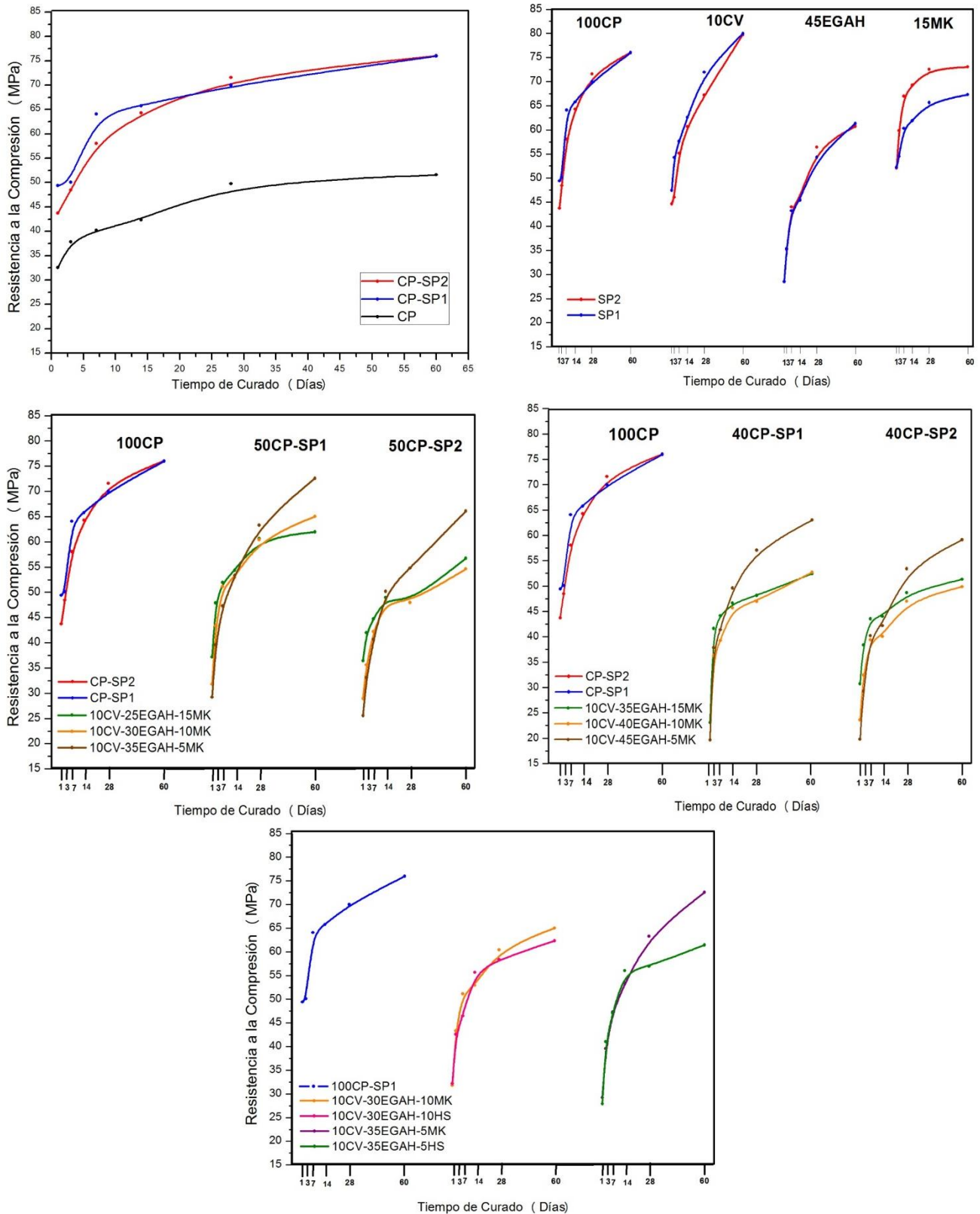


Figura 2. Resistência à compressão dos traços com os aditivos SP1 e SP2: A) Pastas de CP, B) Traços compostos, C) Pastas de CP com 50% de substituição por CV, EGAH e MK, D) pastas de CP com 60% de substituição por EGAH, CV e MK, E) pastas de CP com 50% de substituição por CV, EGAH, MK e sua comparação com HS utilizando o aditivo SP1.

O desenvolvimento da RC dos traços compostos 45EGAH, a 1 e 60 dias de cura, foi inferior à RC das pastas de 100CP e dos traços 10CV e 15MK, sendo este comportamento atribuído à relação água/sólidos adotada, porcentagem de substituição por EGAH e dosagem de SP; a fluidez das pastas com traços compostos 45EGAH foi aumentada, provocando um excesso de água na mistura e, portanto, uma mudança no processo de hidratação e nas propriedades mecânicas do traço.

Os resultados dos ensaios de RC nos cimentos com quatro adições, com ambos superplastificantes, estão apresentados nas figuras 2C e D. É possível notar que o traço 10CV-25EGAH-15MK foi o que apresentou a maior RC a 1 dia de cura (aproximadamente 37 e 36MPa, para ambos os SP). Porém, estas resistências se encontram abaixo da RC das pastas de CP com a mesma idade de cura. A pasta 10CV-35EGAH-5MK, para os dois aditivos superplastificantes, desenvolveu uma melhor RC aos 60 dias de cura, sendo maior para SP1 (73MPa). Este comportamento está relacionado com o observado nos traços compostos com 10CV e 15MK, já que se evidenciou o efeito da atividade pozolânica do MK no desenvolvimento da RC nas primeiras idades, por sua vez, a atividade pozolânica da CV e a maior proporção de EGAH beneficiou o desenvolvimento da RC aos 60 dias de cura. Além disso, pode-se observar que as pastas com SP1 desenvolveram RC superiores àquelas com SP2.

Os fatores que puderam influenciar este comportamento foram a relação água/sólidos, a dosagem de superplastificante e a dispersão causada pelos aditivos. Por outro lado, o crescimento da RC das pastas de CP com 60% substituição CV, EGAH e MK mostra uma tendência similar aos resultados de RC das pastas com 50% de substituição; porém, o crescimento da RC nas primeiras idades foi menor. Além disso, a pasta 10CV-35EGAH-15MK com ambos os aditivos apresentou uma maior RC a um dia de cura em comparação com a pasta 10CV-45EGAH-5MK que demonstrou uma melhor RC aos 60 dias de cura. Devido à pasta 10CV-35EGAH-5MK, elaborada com SP1, apresentar altos valores de RC aos 60 dias de cura, foi comparado o efeito da substituição de 5% de MK por 5% de HS. Além disso, considerou-se estudar o mesmo efeito na pasta 10CV-30EGAH-10MK.

A evolução dos resultados da Figura 2E indica que as pastas 10CV-30EGAH-10MK e 10CV-35EGAH-5MK apresentaram maior RC que as pastas com 10CV-30EGAH-10HS e 10CV-35EGAH-5HS aos 60 dias de cura, sendo maior a resistência nas pastas onde foi utilizado MK (~73MPa). Roy (2001) destaca que a HS aumenta a resistência somente nas primeiras idades, enquanto que a RC diminui com o aumento da porcentagem de CV nas idades mais avançadas. Porém, neste estudo, a porcentagem de substituição por CV foi mantida fixa. Além disso, as maiores resistências foram observadas nas pastas com maior porcentagem de substituição por EGAH e aos 60 dias de cura, corroborando o estudo de Gesoglu et al. (2003), os quais concluíram que a adição de 30% de EGAH e 10% de HS aumenta a RC aos 28 dias de cura.

### 3.2. Difração de raios X

Foram analisadas amostras representativas das pastas de cimento com substituição de 50% e 60%, elaboradas com os dois SP e curadas durante 28 dias, sendo observadas as seguintes fases:

- ✦ - Portlandita (CH), C - Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ),  $\alpha$  - Quartzito ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ), ★ - Alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), ▲ - 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 ( $(\text{Mg}_{0.667}\text{Al}_{0.33})(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_{0.167}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}$ ).

Na Figura 3A se apresenta os resultados da análise de DRX da pasta de CP elaborada com SP1 (CP-SP1) e na 3B as pastas elaboradas com SP2 (CP-SP2) aos 28 dias de hidratação, onde é possível observar que para ambas se apresentaram as reflexões características da portlandita (CH) na posição

angular  $2\theta$  de  $18,08^\circ$  e  $34,3^\circ$ . Além disso, no traço CP-SP1 foi identificada etringita, com reflexões características nas posições angulares  $2\theta$  de  $9,147^\circ$ ,  $23^\circ$  y  $51,784^\circ$ . A etringita está diretamente relacionada com a quantidade de  $C_3A$  e a disponibilidade de íons  $SO_4^{2-}$  na fase líquida (Meredith et al., 2004).

Um estudo realizado sobre o efeito dos aditivos superplastificantes base policarboxilato no processo de hidratação do  $C_3A$  demonstrou que as moléculas do aditivo superplastificante se adsorvem preferencialmente na superfície da fase  $C_3A$  [Plank et al. (2006)]. Porém, durante a hidratação inicial do  $C_3A$ , as moléculas do aditivo superplastificante podem formar complexos organometálicos para intercalar entre as camadas das fases de hidratação do  $C_3A$ . A intercalação de moléculas de policarboxilato é um processo indesejável, uma vez que reduz o efeito de dispersão das partículas de cimento. Plank et al. (2010) realizaram um estudo sobre o mecanismo de intercalação dos policarboxilatos entre as camadas das fases hidratadas de  $C_3A$  e a função dos íons sulfato presentes no cimento e observaram que uma alta concentração de íons sulfato na solução aquosa favorece o mecanismo de intercalação dos íons sulfatos entre as camadas das fases hidratadas de  $C_3A$ , dando lugar à formação das fases  $AF_t$  e  $AF_m$ .

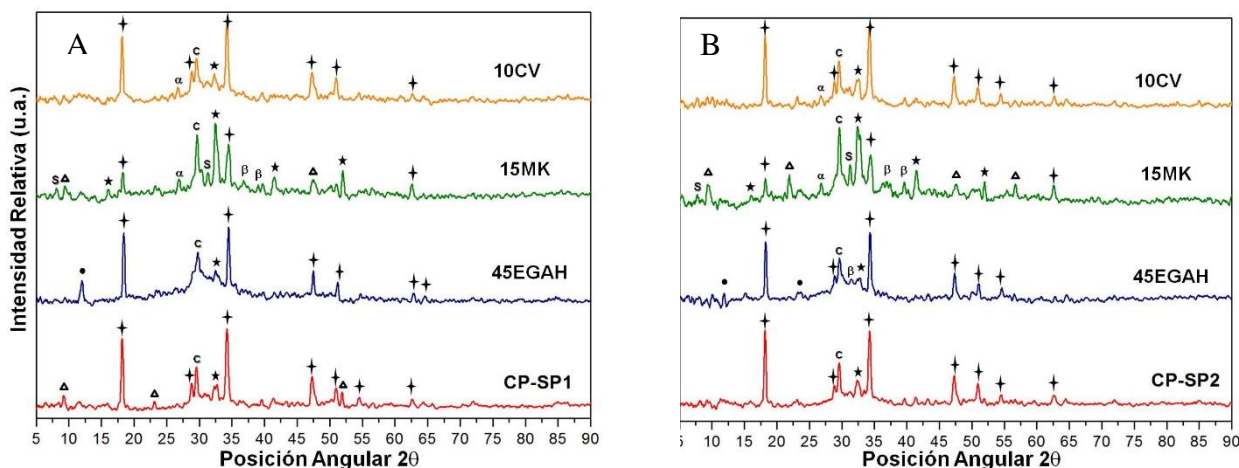


Figura 3. Padrão de difração dos traços compostos aos 28 dias de cura, elaborados com (A) aditivo SP1 e (B) aditivo SP2.

Na Figura 3 também se apresenta os padrões de DRX dos traços compostos 10CV, 15MK e 45EGAH elaborados com os aditivos SP1 e SP2. Nesta figura é possível observar que a pasta 15MK apresentou uma maior atividade pozolânica, devido à intensidade de reflexão do CH em  $34,3^\circ$  da posição angular  $2\theta$  ter diminuído em maior intensidade em relação às demais pastas, o que foi relacionado com o maior consumo de CH. Também foi possível identificar a etringita- $Ca_2Al_2SiO_7 \cdot 8H_2O$  (posição angular  $2\theta$  em  $7,045^\circ$  e  $31,08^\circ$ ), fase da família de fases  $AF_m$  e característica dos produtos de hidratação das pastas de cimento com substituição por MK (Janotka et al., 2010) e da hidratação da EGAH (Martinez Alvarado, 2009).

Também foi identificada a fase etringita, cuja intensidade foi ligeiramente maior na pasta de 15MK do aditivo SP2. A formação de etringita é evidente devido à reação preferencial dos aluminatos de MK com os íons  $SO_4^{2-}$  do CP [Talero, (2005)]. Nos mesmos padrões também se observou a presença de  $C_3S$  e  $\beta-C_2S$ , indicando uma reação incompleta das fases do cimento Portland, pelo menos até os primeiros 28 dias de cura. Noutras fases foram identificadas hidrotalcita (posição angular  $2\theta$  de  $11,81^\circ$ ), que se apresentou nas pastas 45EGAH com ambos os aditivos. A intensidade do pico de reflexão característica desta fase foi ligeiramente maior na pasta 45EGAH com aditivo

SP1. A formação desta fase é atribuída à hidratação da EGAH, mediante a ativação causada pela presença de CH. Haha et al. (2011) relataram que para uma escória ativada alcalinamente, foi observada hidrocalcita intercalada com o C-S-H e o MgO, que continham a escória como um dos produtos de reação.

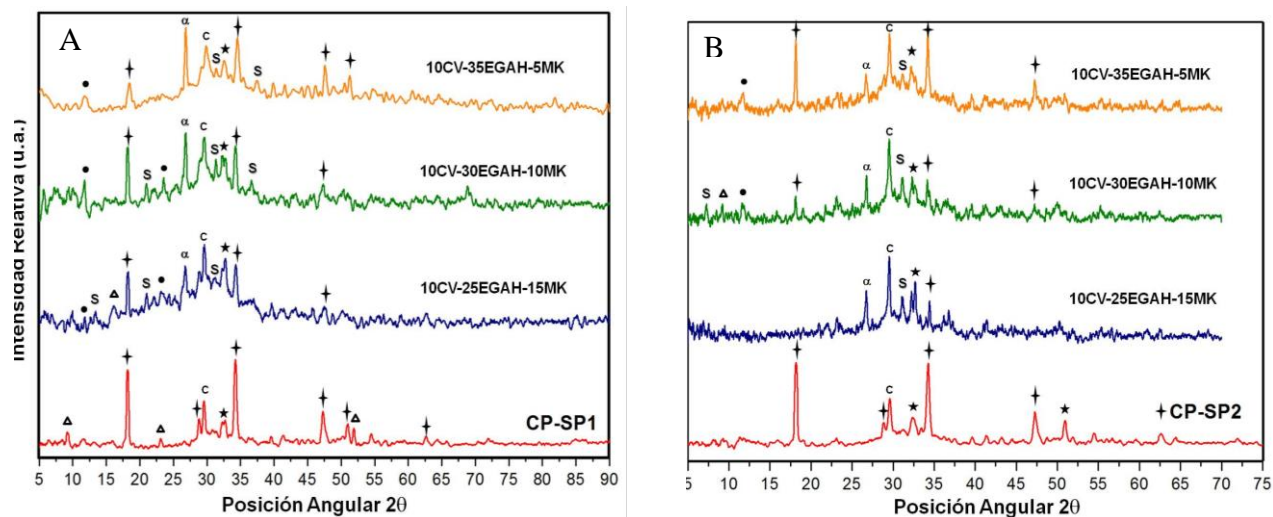


Figura 4. Padrão de difração para as pastas de CP com substituição de 50% por CV, EGAH e MK, usando o aditivo (a) SP1 e (b) SP2 aos 28 dias de cura.

A Figura 4A apresenta os padrões de difração das pastas de CP e das pastas de CP com 50% de substituição por CV, MK e EGAH e elaboradas com SP1, aos 28 dias de cura. Com base nos resultados, é possível considerar um alto consumo de hidróxido de cálcio causado pela relação pozolânica da CV e do MK e pela hidratação da EGAH, como a estratlingita e hidrotalcita, respectivamente. Além disso, a análise das pastas de CP com substituições de CV, MK e EGAH indicou que a pasta 10CV-35EGAH-5MK apresentou as reflexões características de estratlingita (posição angular  $2\theta$  de  $11,65^\circ$  e  $34,88^\circ$ ) e hidrotalcita, e na pasta 10CV-30EGAH-10MK só foi encontrada estratlingita. Com base nestes resultados, é possível considerar que com uma porcentagem de substituição de 15% de MK em pastas de cimento Portland com substituição por CV, EGAH e MK, a formação de estratlingita é favorecida, devido à atividade pozolânica do MK nas primeiras idades. Também se sugere que a formação da hidrotalcita ocorre pela ativação da EGAH com o CH e esta é favorecida aos 28 dias de cura, no traço com maior porcentagem de substituição por EGAH.

Na Figura 4B se apresentam os padrões de difração das pastas de CP e das pastas de CP com 50% de substituição por CV, MK e EGAH, elaboradas com SP2 e com 28 dias de cura; de acordo com a análise desta informação, o SP2 apresentou um efeito ligeiramente diferente no processo de hidratação das pastas de cimento em comparação com o SP1, onde foram identificadas nos padrões de difração das pastas de CP reflexões características da etringita de baixa intensidade, a qual não se apresentou nas pastas de CP elaboradas com SP2. Nas pastas 10CV-25EGAH-15MK, 10CV-30EGAH-10MK e 10CV-35EGAH-5MK foram identificadas as reflexões características da estratlingita, não sendo identificadas etringita e hidrotalcita. Estes resultados sugerem que o SP2 se adsorveu preferencialmente na fase C<sub>3</sub>A e a reação dos íons sulfato, cálcio e alumínio na solução aquosa promovem a formação de etringita durante a hidratação inicial. Além disso, a interação das moléculas de policarboxilato do SP2 com a fração amorfa silicoaluminosa favorece a formação de

estratlingita durante a hidratação inicial das pastas de cimento. Nas pastas 10CV-30EGAH-10MK e 10CV-35EGAH-15MK se observou a presença de hidrotalcita. De acordo com estes resultados, o aditivo SP2 favorece a formação da fase estratlingita e um maior consumo de CH nas pastas de maior porcentagem de MK aos 20 dias de cura.

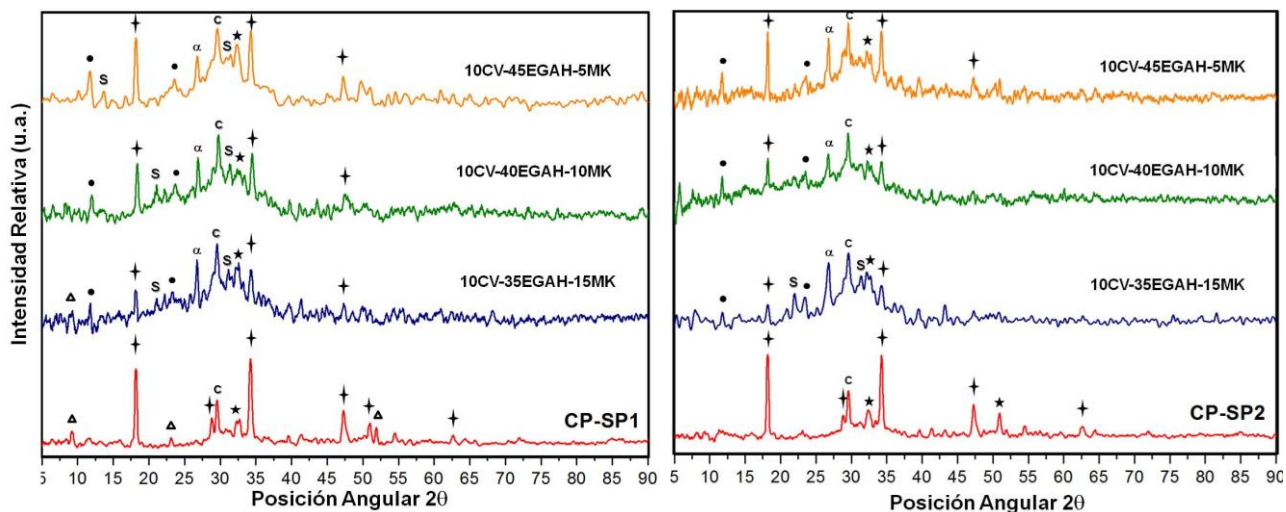


Figura 5. Padrão de difração das pastas de CP com substituição de 60% por CV, EGAH e MK, utilizando o aditivo a) SP1 e b) SP2 aos 28 dias de cura.

Na Figura 5 se apresentam os padrões de difração das pastas de CP com substituição de 60% por CV, EGAH e MK, aos 28 dias de cura. Em geral, a tendência dos resultados de difração de raios X para os traços com 60% de CV, EGAH e MK elaborados com SP1 pode ser descrita como se segue: a intensidade de reflexão do pico característico da fase CH na posição angular  $2\theta$  de  $34,3^\circ$  diminuiu com maior intensidade nas pastas 10CV-35EGAH-15MK e 10CV-40EGAH-10MK a um e 28 dias de cura. A estratlingita se apresentou numa intensidade menor na pasta 10CV-45EGAH-5MK. Ao empregar o aditivo SP1 e comparar os resultados de 50% e 60% de substituição é possível observar que neste último a presença da fase hidrotalcita. Realizando a mesma comparação, mas para as pastas com SP2, não foi observada a presença de etringita aos 28 dias de cura e que nas pastas 10CV-40EGAH-10MK e 10CV-45EGAH-5MK não se apresentaram as reflexões da estratlingita aos 28 dias de cura.

### 3.3. Calorimetria Isotérmica por Condução

Inicialmente, os aditivos superplastificantes foram testados nas pastas de CP, em seguida, com base na porcentagem de substituição e dos resultados de RC, foram selecionados os traços 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK elaborados com ambos os aditivos. De acordo com os resultados de RC, as pastas com o aditivo SP1 apresentaram as maiores RC, e por esse motivo foi selecionada outra pasta para este aditivo, a 10CV-30EGAH-10MK. Finalmente, foi realizada uma comparação entre o efeito da adição de HS no lugar de MK nas pastas elaboradas com o aditivo SP1. A figura 6 mostra os resultados das análises por calorimetria isotérmica das pastas de CP com e sem aditivos a  $25^\circ\text{C}$ .

É possível observar que o pico principal da curva de evolução do calor de hidratação da pasta de CP sem aditivo, devido à hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$ , corresponde a 9 horas de hidratação. Comparando esta curva com aquelas obtidas para o CP com ambos os aditivos, é possível observar um deslocamento

das mesmas no pico principal de hidratação, correspondente a 11 horas, evidenciando um atraso no processo de hidratação. Tem sido relatado que os aditivos superplastificantes retardam a hidratação dos silicatos (especialmente do C<sub>3</sub>S). Lothenbach et al. (2007) destacam que os superplastificantes base policarboxilatos retardam a dissolução do C<sub>3</sub>S, e conseqüentemente a formação de portlandita e C-S-H. Além disso, observou-se uma diferença no início do período de aceleração entre as pastas de CP sem aditivo e as pastas que continham SP1 e SP2.

O tempo de hidratação inicial do período de aceleração para as pastas de CP foi de 2,5h, enquanto que para as pastas com SP1 foi de 4h e para aquelas com SP2 foi de 3h. Esta diferença foi atribuída ao fato de que o período de indução na presença de ambos os aditivos foi maior, oferecendo mais tempos à reação de hidratação do C<sub>3</sub>S para formar C-S-H. Também se observa que a evolução do calor de hidratação (J/kg-h) e a liberação do calor total (Q/kg) da pasta de CP com SP2 foi maior que a pasta de CP sem aditivo e a pasta com SP1. O período de aceleração devido à nucleação e crescimento do gel C-S-H e CH para as pastas com SP2 foram mais exotérmicos.

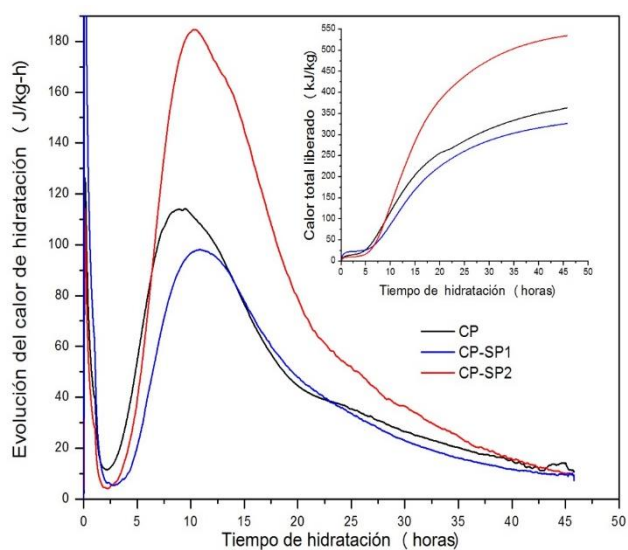


Figura 6. Curvas de evolução do calor de hidratação e do calor total liberado das pastas de CP sem aditivo e com os aditivos SP1 e SP2.

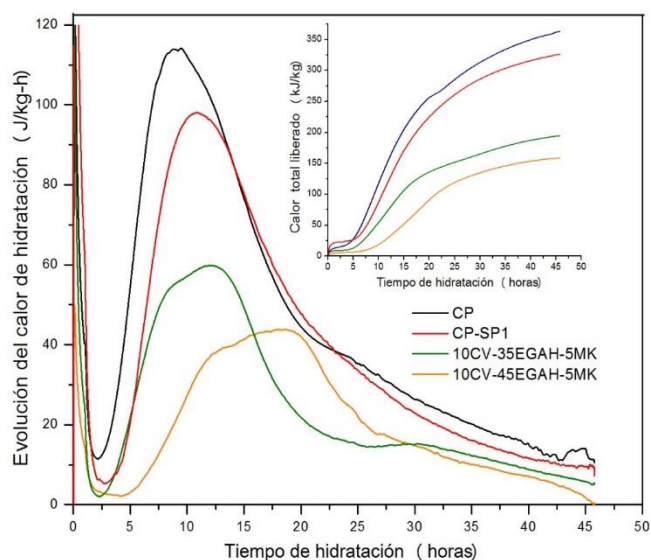


Figura 7. Curvas de evolução do calor de hidratação e do calor total liberado da pasta de CP sem aditivo, com SP1 e as pastas com substituição por CV, EGAH e MK elaboradas com o aditivo SP1.

A partir destes resultados, é possível sugerir que os aditivos superplastificantes alteram o mecanismo de hidratação das pastas de CP, porém cada aditivo apresentou um comportamento diferente no cimento puro. Desta forma, o aditivo SP1 influenciou na prolongação do período de indução, o qual pode estar relacionado com o efeito de dispersão provocado pela repulsão estérica dos grupos funcionais éter dos aditivos superplastificantes base éter-polycarboxilato, associado à presença do grupo funcional éter-vinílico nos SP1.

O aditivo SP2 causou um período de indução menor que o da pasta de CP com o aditivo SP1, o que pode ser atribuído à menor adsorção das moléculas de polycarboxilatos na superfície das partículas de cimento. O aditivo SP2 apresentou duas *bandas adicionais de absorção características de sais de carboxilato*. Tem sido relatado que os aditivos superplastificantes base polycarboxilatos de longa cadeia lateral e alta densidade diminuem o atraso do período de indução devido às moléculas de polímero serem adsorvidas em menor proporção na partícula de cimento. É possível que a rápida



evolução do calor de hidratação durante o período de aceleração do processo de hidratação da pasta de CP com o aditivo SP2 se relacione com a baixa adsorção das moléculas de polímero na superfície das partículas de cimento, devido a maior difusão de íons  $\text{Ca}^+$  e água da fase líquida para a fase sólida, que poderia ter gerado um maior número de locais de nucleação e crescimento de CSH.

Mollah et al. (2000) propuseram três mecanismos diferentes para explicar o efeito retardador dos superplastificantes base policarboxilatos na hidratação do cimento, dos quais é possível associar o efeito de SP1 e SP2 com dois deles: (a) as moléculas do superplastificante são adsorvidas na superfície da partícula de cimento e dificultam a difusão de água e íons de cálcio na interface cimento-solução, porém a adsorção no  $\text{C}_3\text{S}$  é menor que no  $\text{C}_3\text{A}$ , (b) a ação dispersante do superplastificante altera a cinética de crescimento e a morfologia das fases hidratadas. De acordo com os resultados de DRX, um dos produtos de hidratação formados na pasta de CP com o aditivo SP1 aos 28 dias de cura foi a etringita, que pode ser sido formada durante o período de indução, devido ao fato da adsorção das moléculas de éter-policarboxilato do aditivo SP1 ter reduzido a difusão de íons  $\text{Ca}^+$  e a água da fase líquida para a fase de silicato de cálcio hidratada e é possível que a reação da fase de aluminato de cálcio hidratada e os íons  $\text{SO}_4^{2-}$  da solução aquosa tenham sido favorecidos.

Na Figura 7 estão comparadas as curvas de evolução do calor de hidratação das pastas 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK elaboradas com SP1. A evolução do calor de hidratação nas pastas 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK foi menor que nas pastas de CP sem aditivo e com SP1. Os estudos de Langan et al. (2002) e Snelson et al. (2008) mostram que a evolução do calor de hidratação das pastas de cimento composto com EGAH, CV e MK é menor que a da pasta de CP e relacionam este fenômeno com a maior demanda de água dos materiais pozolânicos e à menor disponibilidade de íons  $\text{Ca}^+$  para o crescimento de CH e C-S-H.

Outra diferença das pastas 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK, em relação às pastas de CP, é a formação de um pico adicional na curva de evolução do calor de hidratação durante o período de aceleração. Talero e Rahhal (2009) relatam um terceiro pico nas curvas de evolução do calor de hidratação das pastas de CP com 20% de substituição por MK, o qual se relaciona com a atividade pozolânica do  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  do MK. Escalante (1996) também relata o aparecimento de um terceiro pico na curva de evolução do calor de hidratação devido à contribuição da EGAH ao processo de hidratação a temperaturas de 10 a 60°C. Também é possível relacionar este aumento na evolução do calor de hidratação com a formação de produtos de hidratação como a estratlingita e hidrotalcita, favorecidas pela ativação da EGAH e beneficiando a formação de hidrotalcita, e à atividade pozolânica do MK a formação de estratlingita e se baseado nos resultados de RC, que foram maiores para a pasta 10CV-35EGAH-5MK elaborada com SP1.

O atraso no processo de hidratação das pastas 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK em relação às pastas de CP sem aditivo e com o aditivo SP1 pode estar relacionado a uma dissolução lenta do  $\text{C}_3\text{S}$  para produzir C-S-H e CH. Porém, este efeito foi mais significativo para a pasta 10CV-45EGAH-5MK, pois o seu pico principal foi observado às 12,5h, em comparação com a pasta 10CV-35EGAH-5MK, que foi às 8h. Esta diferença se deve, provavelmente, a maior porcentagem de EGAH e ao efeito retardador da CV. De acordo com Hwang e Shen (1991), o aumento na quantidade de EGAH reduz o calor de hidratação produzido pelo  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{A}$ . Langan et al.(2002) constataram que durante os primeiros minutos da hidratação das pastas de CP com 10% e 20% de CV, a concentração de íons na solução é diminuída nas primeiras horas, atrasando a nucleação e crescimento de C-S-H e CH.

Os resultados da análise de calorimetria isotérmica a 25°C para as pastas 10CV-35EGAH-5MK e 10CV-45EGAH-5MK com o aditivo SP2 estão apresentados na Figura 8. A evolução do calor de hidratação destas pastas foi menor (60 e 50J/kg-h), conforme discutido anteriormente. Estas curvas também apresentaram um terceiro pico devido à atividade pozolânica do MK e a hidratação da

EGAH. Além disso, o atraso do processo de hidratação durante o período de indução foi menor para estes traços, o que pode estar relacionado com a menor adsorção das moléculas de SP2 na superfície das partículas de cimento.

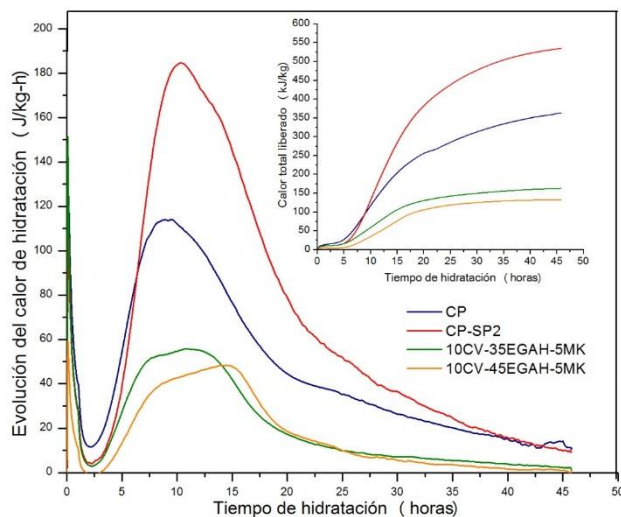


Figura 8. Curvas de evolução de calor de hidratação e do calor total liberado pela pasta de CP sem aditivo, com SP2 e as pastas com substituição por CV, EGAH e MK elaboradas com o aditivo SP2.

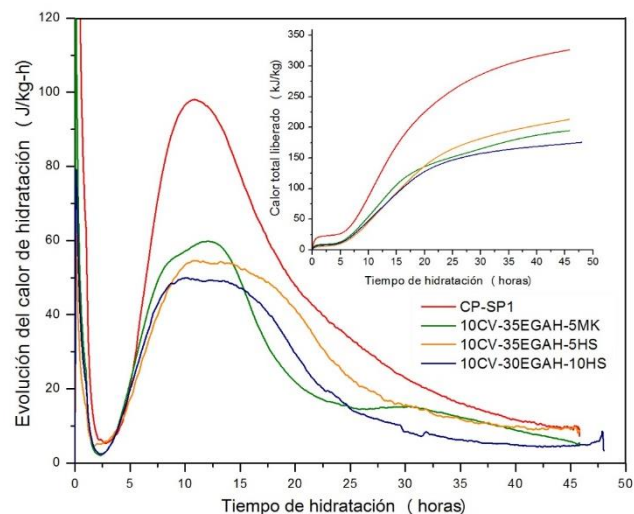


Figura 9. Curvas de evolução do calor de hidratação e do calor total liberado da pasta de CP com SP1 e as pastas com substituição por CV, EGAH, MK e HS elaboradas com o aditivo SP1.

Os resultados da análise de calorimetria isotérmica para a pasta de CP com SP1 estão apresentados na Figura 9, onde é feita uma comparação com o comportamento de um traço adicional elaborado com 5% e 10% de HS. Pode-se observar que as reações de hidratação das pastas 10CV-35EGAH-5HS e 10CV-30EGAH-10HS desenvolveram um menor calor de hidratação que a pasta 10CV-35EGAH-5MK. Este fenômeno se relaciona com os resultados de RC, que na presença de MK resultou os melhores resultados nas primeiras idades. A diminuição no calor de hidratação pode estar relacionada a: (1) precipitação dos produtos de reação das pastas de CP com MK foi menos exotérmica que nas pastas de CP e (2) devido a menor quantidade de cimento utilizado, é possível que exista uma menor quantidade de produtos de hidratação formados nas etapas iniciais [Janotka et al. (2010)]. O calor total liberado pela pasta 10CV-30EGAH-5HS foi maior que o da pasta 10CV-35EGAH-5MK, que pode estar relacionado ao fato de que durante a hidratação da pasta 10CV-30EGAH-5HS se prolongou o período de desaceleração, favorecendo o processo de hidratação de CP, e de que tanto a reação pozolânica da CV e da HS como a ativação da EGAH foram mais exotérmicas.

#### 4. CONCLUSÕES

- A adição de 10% de CV melhorou o crescimento da RC em traços compostos. A porcentagem de substituição ótima da EGAH nas pastas que também continham CV e MK foi de 35% e 45%. Esta porcentagem de substituição favoreceu o crescimento da RC aos 60 dias de idade/cura, sendo maior no traço com 10CV-35EGAH-5MK. O aditivo SP favoreceu o crescimento da RC do traço de pasta de cimento composto 10CV-35EGAH-5MK. O aditivo SP2 favoreceu o aumento da RC dos traços compostos de pasta de CP com 15% de substituição por MK.

- A atividade pozolânica do MK foi favorecida nas pastas de cimento com maior porcentagem de substituição de MK a um dia de cura, o que beneficiou o aumento da RC.
- O processo de hidratação da EGAH conduziu à formação de hidrotalcita, sendo favorecida nas pastas com maior substituição por EGAH. A hidratação do MK e a reação pozolânica com o CH da hidratação do CP favoreceram a formação de estratlingita nas pastas de CP com 15% de MK e nas pastas de CP com substituição por CV, EGAH e MK.
- Na curva de calor de hidratação das pastas de CP, os aditivos superplastificantes atrasaram a nucleação e o crescimento do gel C-S-H. Na curva de calor de hidratação das pastas de CP, o aditivo SP2 aumentou a liberação do calor de pico principal, sendo um processo mais exotérmico. O aditivo SP1 melhorou o processo de hidratação dos sistemas com CV, EGAH e MK, com altas substituições de EGAH e baixas de MK, apresentando um maior calor de hidratação no pico principal da curva de evolução do calor de hidratação. O calor liberado pela hidratação da EGAH no sistema 10CV- 35EGAH-5MK alterou a curva de evolução do calor de hidratação do CP, apresentando um pico adicional, que se prolongava com um maior nível de substituição por EGAH. Isto resultou um processo de hidratação mais exotérmico para a pasta com SP1. O calor de hidratação devido à atividade pozolânica do MK foi superior ao apresentado pela HS, visto que o pico principal da curva de hidratação do traço 10CV-35EGAH-5MK esteve acima do traço 10CV-35EGAH- 5HS.
- Em geral, o uso de altas quantidades de materiais pozolânicos e hidráulicos na elaboração dos traços aqui apresentados produziram um aumento nas suas propriedades mecânicas, assim como nas reações de hidratação, melhorando a resistência à compressão.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos amplamente o suporte financeiro da CONACYT – México para a realização deste estudo.

## 6. REFERÊNCIAS

- 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 ash 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: microestructural 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 com proteção de superfície e exposto à solução de cloretos: Espessura de cobrimento equivalente

M. H. F. Medeiros<sup>1</sup>, L. V. Real<sup>1</sup>, V. A. Quarcioni<sup>2</sup>, P. Helene<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: [medeiros.ufpr@gmail.com](mailto:medeiros.ufpr@gmail.com), [ligiavr@gmail.com](mailto:ligiavr@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasil. E-mail: [quarciva@ipt.br](mailto:quarciva@ipt.br)

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo (USP), Brasil. E-mail: [paulo.helene@concretophd.com.br](mailto: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 28 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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

O objetivo principal dos testes foi obter o coeficiente de difusão de cloretos e gerar uma previsão de ingresso de cloretos 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 cobrimento 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 cloretos, 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.

## 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.

Autor de correspondência: Marcelo Medeiros

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de proteção de superfície no concreto é uma possibilidade de se aumentar a vida útil de estruturas expostas a ambientes marinhos. Esse tipo de proteção inibe a penetração de agentes agressivos por difusão, migração e absorção por capilaridade.

Os materiais de proteção de superfície para concreto podem ser classificados em três grupos: hidrofugantes (repelem a água), bloqueadores de poros (reagem com alguns componentes solúveis do concreto e formam produtos insolúveis) e formadores de película (formam um filme contínuo na superfície do concreto). A Figura 1 ilustra esses três grupos de proteção de superfície.

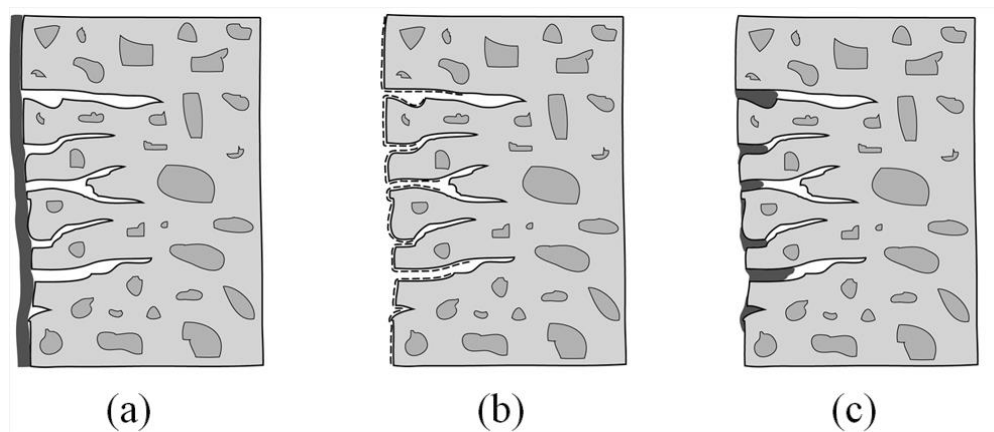


Figura 1. Grupos de tratamento de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes de superfície (adaptado de Keer, 1992).

### 1.1 Formadores de película:

Os formadores de película apresentam a vantagem de prover uma barreira física na superfície do concreto, que o isola de agentes agressivos do ambiente externo. Esses produtos exigem um substrato homogêneo e liso com poros de dimensão máxima igual a 0,1 mm. Isso significa que são capazes de cobrir fissuras de até 0,1 mm. No entanto, a película rompe se o concreto fissurar depois de ter sido realizada a pintura. Além disso, se o concreto estiver com elevada umidade interna antes da aplicação, a película não permite que o concreto seque. Isso pode deteriorar o filme de proteção, causando a formação de bolhas devido à pressão de vapor da umidade interna. Pelo ponto de vista arquitetônico, esse grupo de tratamentos de superfície modifica a estética da estrutura adicionando brilho ou cor à superfície do concreto, que algumas vezes é desejada e outras não (Helene, 2000). Esse grupo de tratamento de superfície (formador de película) foi intensamente estudado nos últimos quinze anos. Delucchi *et al.* (1998) estudaram a importância dos parâmetros E (módulo de elasticidade) e  $\eta$  (viscosidade) na aderência da película. Seneviratne *et al.* (2000), utilizando análise termo-mecânica, sugeriram que a película de maior sucesso é aquela com capacidade de manter suas propriedades elastoméricas ao longo do período necessário de exposição e sobre uma ampla gama de temperaturas operacionais. Uemoto *et al.* (2001) mostraram a correlação entre o teor em volume de pigmento de tinta e a sua permeabilidade à água. Al-Zahrani *et al.* (2002) mostraram que os sistemas de proteção por formação de película apresentam eficiência de inibição da corrosão acelerada coerente aos resultados obtidos das propriedades físicas, em particular, absorção de água, permeabilidade e penetração de íons cloreto. Medeiros e Helene (2009) afirmam que a determinação do coeficiente de difusão de cloretos permite uma comparação quantitativa dos

sistemas de proteção e, por isso, seu cálculo deve ser viabilizado em ensaios de migração. Os formadores de película são provavelmente os mais utilizados na indústria da construção e essa deve ser a razão para serem extensamente estudados em comparação aos demais sistemas de proteção de superfície.

### 1.2 Hidrofugantes de superfície:

Agentes repelentes de água ou hidrofugantes sempre resultam de resina de silicone que são quimicamente combinadas com a base de concreto. Atualmente, os materiais mais utilizados são os silanos, siloxanos oligoméricos e a mistura desses dois compostos (Medeiros; Helene, 2008). Quimicamente, os silanos são formados por pequenas moléculas que contêm um átomo de silício e os siloxanos são pequenas cadeias de poucos átomos de silício, cujas moléculas contêm grupos alcoxi (orgânicos) ligados ao átomo de silício. Os silanos e siloxanos reagem com os silicatos do concreto, formando uma aderência estável (1997) (Figura 2). Medeiros *et al.* (2009) mostraram que a penetração de agentes hidrofugantes é melhor nas faces de rasadura do que nas de contato com a fôrma, devido a maior permeabilidade do primeiro. Jacob; Hermann (1998), Batista (1998) and Moriconi *et al.* (2002) apresentaram uma ampla revisão bibliográfica sobre agentes hidrofugantes. O uso desses agentes na indústria da construção civil está crescendo em uma taxa interessante e tem sido razoavelmente estudado. No entanto, há alguns itens ainda em estudo, como a influência do mecanismo de penetração de água (sucção por capilaridade e permeabilidade) na eficácia do tratamento com hidrofugantes (Medeiros; Helene, 2008).

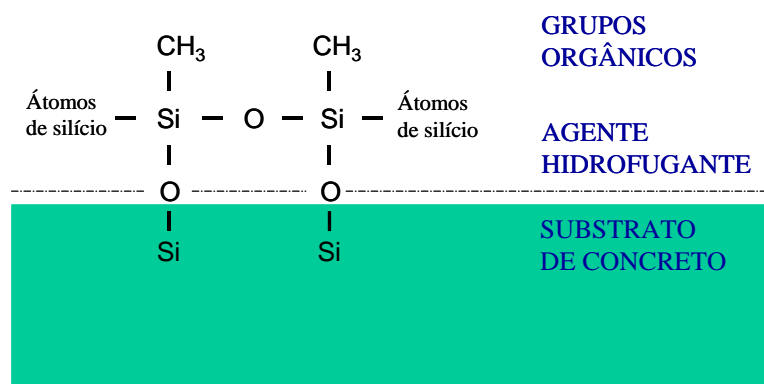


Figura 2. Ligação química do agente hidrofugante com concreto (adaptado de Vries and Polder, 1997).

### 1.3 Bloqueadores de poros

Bloqueadores de poros, como silicato de sódio, são usados na indústria de cimento para várias aplicações. Por exemplo: como ativador de cimento de escória, como aditivo protetor de fibras vegetais em compósitos de cimento, como endurecedor de superfície para pisos industriais e como sistema de proteção de superfície para concreto (Mehta, Monteiro, 2008; Brough, Atkinson, 2002; Jones, 2002; Toledo *et al.*, 2003; Melo Neto, 2009).

Mesmo que esse grupo de tratamento seja conhecido há vários anos, pouca informação técnica e científica foi publicada sobre este assunto. Por outro lado, muitos produtos desse tipo são comercializados e indicados para a proteção de superfícies de concreto. Thompson *et al.* (1997) explicaram as três teorias de como os silicatos agem para melhorar o desempenho do concreto:

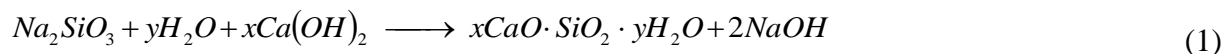
- Precipitação de SiO<sub>2</sub> nos poros;



- Formação de um gel expansivo, similar ao formado na relação álcali silicato, dentro dos poros;
- Reação dos silicatos com o hidróxido de cálcio presente nos poros formando silicato de cálcio hidratado.

A última teoria é a mais aceita atualmente. Desse modo, teoricamente, os bloqueadores de poros são produtos compostos por silicatos, que penetram nos poros superficiais e reagem com a portlandita formando C-S-H. O silicato de sódio é o produto mais usado para esse fim.

De acordo com Thompson *et al.* (1997), a Equação 1 representa o que acontece quando a solução de silicato de sódio penetra nos poros do concreto.



Assim, esse tratamento forma uma camada menos porosa na camada superficial do concreto, modificando a penetração de água no material. Esse tratamento requer que o silicato de sódio reaja com a portlandita  $[Ca(OH)_2]$ . Portanto, é fácil entender que no concreto carbonatado a reação da Eq. 1 não ocorre, pois o  $Ca(OH)_2$  da camada mais externa já reagiu com o  $CO_2$ , formando  $CaCO_3$ . Isso foi explicado por Kagi e Ren (1995), que afirmaram que uma redução significativa da penetração de água no concreto devido ao tratamento com solução de silicato só é obtida se o concreto for muito novo e se repetidas aplicações forem realizadas para preencher os poros capilares. Outra contribuição de Kagi e Ren (1995) é relacionada com a permeabilidade ao vapor de água do substrato, que não é significativamente afetada pelos silicatos, porque eles não bloqueiam os poros capilares totalmente. Ibrahim *et al.* (1997) concentraram seu trabalho em mensurar o tempo necessário para que as amostras de concreto armado tratadas com silicato de sódio fissurassem por corrosão e concluíram que os resultados foram semelhantes aos das amostras não tratadas (série de referência). No entanto, os resultados de Ibrahim *et al.* (1997) não estão de acordo com os de Thompson *et al.* (1997) sobre a absorção de água. É importante salientar que Ibrahim *et al.* (1997) não informaram a concentração de silicato de sódio que utilizaram no estudo e a utilização de uma baixa concentração pode ter influenciado os seus resultados. Thompson *et al.* (1997) compararam as concentrações de silicato de sódio nos produtos de proteção e o valor em torno de 26% apresentou maior eficiência.

É importante enfatizar que os bloqueadores de poros devem ser aplicados depois que todas as cargas de projeto estejam em atuação e as fissuras e microfissuras ocorrerem. No entanto, os efeitos do ambiente podem causar mais fissuras. Se houver fissuras (grandes o suficiente para serem visíveis) antes da aplicação dos silicatos, é necessário repará-las antes de se realizar o tratamento da superfície. Se houver fissura após o tratamento, elas precisam ser tratadas imediatamente devido à ruptura da camada de baixa porosidade. Esse é o principal problema do tratamento de superfície (hidrofugantes, bloqueadores de poros e formadores de película): eles não absorvem a deformação do substrato de concreto. Isso significa que a camada de proteção formada rompe se o concreto fissurar, causando imediata imperfeição do sistema de proteção.

É importante lembrar que, independentemente da dimensão da fissura, os poros restantes serão menores do que se não houvesse o bloqueador de poros na superfície. Então, o ataque do meio ambiente será isolado na área fissurada e as outras regiões continuarão protegidas.

Em geral, pode-se dizer que são necessárias mais informações sobre a capacidade de proteção de silicatos aplicados em superfícies de concreto armado. Por outro lado, o uso desse tipo de proteção do concreto é amplo e sua aplicação contribui para a elevação da vida útil, uma vez que podem ser aplicados como métodos de prevenção ou de correção.

De modo geral, a abordagem da vida útil tem evoluído significativamente durante os últimos anos (Castro-Borges, Helene, 2007) e isso se deve principalmente à introdução de mais parâmetros quantitativos do que há alguns anos. Esses parâmetros incluem novos conceitos como operacionalidade, funcionalidade, segurança, confiabilidade e durabilidade.

Este trabalho está focado na avaliação de sistemas de tratamento de superfícies de concreto submetidas à exposição a água contaminada com cloreto de sódio e em condições de migração. Desse modo, o principal objetivo deste artigo é indicar uma maneira de estimar a influência dos tratamentos de superfície de concreto na vida útil de uma estrutura de concreto armado exposta à contaminação por cloretos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Concreto do substrato

O cimento utilizado para a confecção do substrato foi um cimento composto com escória (CPII-E 32). A Tabela 1 apresenta a caracterização física e química deste material.

Tabela 1. Composição química e propriedades físicas do cimento CPII-E 32

(a) Composição química (%)										
Cimento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cal livre	Álcalis totais como Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> *
CPII-E 32	22,80	6,75	2,45	56,40	3,20	1,83	0,12	0,61	0,44	0,52
* Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O										
(b) Propriedades físicas										
Cimento	Massa específica (23°C)	Finura		Tempo de pega		Resistência à compressão – NBR 7215/96 (MPa)				
	(kg/dm <sup>3</sup> )	Resíduo na peneira 75µm (%)	Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Início (h:min)	Fim (h:min)	3 dias	7 dias	28 dias		
CPII-E 32	3,02	3,6	395	3:40	5:30	15,9	24,0	37,5		

O traço do concreto utilizado está descrito na Tabela 2. Os corpos de prova foram adensados com o auxílio de uma mesa vibratória para assegurar a compactação adequada. O processo de cura adotado consistiu em condicionar as amostras em câmara úmida com U.R. igual a 100% e temperatura de 24°C por 91 dias. Esse período foi adotado para promover um alto nível de hidratação no concreto e eliminar a influência de uma cura adicional que poderia ocorrer durante os ensaios devido à exposição à água, o que poderia afetar a série de referência em relação as séries com superfície tratada.

Tabela 2. Traço do concreto do substrato

Proporção cimento:agregados	Relação água/cimento	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa) – 28 dias
1 : 4,5	0,52	358	644,4	966,6	2155	32

## 2.2 Materiais de proteção de superfície

Os materiais de tratamento de superfície utilizados neste estudo estão descritos na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta o tipo de cura, o número de camadas e o consumo recomendado pelos fabricantes de cada material. Vale salientar que no experimento existem representantes dos três grupos de sistemas de proteção abordados neste trabalho.

Tabela 3. Características dos materiais de proteção de superfície

Produto	Tipo de sistema	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosidade CPs (temperatura = 20°C)	Tempo de secagem (h)
Silano/siloxano	Hidrofugante de superfície	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	Duplo	---	---	---

Tabela 4. Tipo de cura e consumo recomendado pelos fabricantes

Produto	Consumo (g/m <sup>2</sup> de revestimento)	Número de camadas	Tipo de cura
Silano/siloxano disperse em água	300	1	Evaporação da água + 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 difusão por ensaio de migração

O método utilizado para estimar o coeficiente de difusão de cloretos foi baseado no procedimento descrito por Luping & Nilsson (1992), que consiste na medição da profundidade de penetração de cloretos livres nas fatias de concreto fraturadas no sentido do fluxo de cloretos, utilizando aspersão de uma solução aquosa de 0,1 M de AgNO<sub>3</sub> (Andrade *et al.*, 1999) e na aplicação da Equação 2. Como o método se baseia na profundidade de penetração de cloretos livres, deve-se destacar que os cloretos fixos são ignorados e que existe a possibilidade de liberação de uma parcela dos cloretos fixos, tornando-se livres. Isso faz o método gerar constatações, de certa forma, contra a segurança, porém, esta prática foi implementada pela facilidade de ensaio e pelo fato de que no momento da avaliação é a penetração dos cloretos livres que efetivamente influencia a despassivação do aço.

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

Onde:  $D$  é o coeficiente de difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $R$  é a constante dos gases ( $8,31 \text{ J/molK}$ ),  $T$  é a temperatura ( $298 \text{ K}$ ),  $z$  é a valência do íon (para cloretos é igual a  $-1$ ),  $F$  é a constante de Faraday ( $96,5 \text{ J/Vmol}$ ),  $E$  é o campo elétrico ( $-600\text{V/m}$ ),  $x_d$  é a profundidade de penetração de cloretos ( $\text{m}$ ) e  $t$  é o tempo de ensaio. Para  $E = -600\text{V/m}$  e  $T = 298 \text{ K}$ ,  $a = 1,061$  e  $b = 0,589$ . O modelo é baseado no estado não estacionário de transporte de íons cloretos.

Foram extraídas três fatias centrais de  $50 \text{ mm}$  de cada corpo de prova cilíndrico ( $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ). Em seguida, as amostras foram mantidas em uma estufa a  $60^\circ\text{C}$  até se obter massa constante. Então, os materiais de proteção de superfície foram aplicados sobre as superfícies circulares dos corpos de prova. Sete dias após a aplicação dos tratamentos, os corpos de prova foram saturados conforme indica o procedimento da ASTM C 1202/12 (2012). Em todos os casos foram seguidas as orientações dos fabricantes quanto à quantidade de material a ser aplicada.

A fatia de  $50 \text{ mm}$  de espessura foi posicionada entre duas células de acrílico. Uma célula foi preenchida com solução  $0,3 \text{ N NaOH}$  e a outra com solução de  $3,0\%$  de  $\text{NaCl}$ . As células foram conectadas a uma fonte de tensão com diferença de potencial de  $30 \text{ V}$  e mantidas nessa condição durante  $30\text{h}$ . O esquema gráfico do ensaio acelerado de migração de cloretos está apresentado na Figura 3.

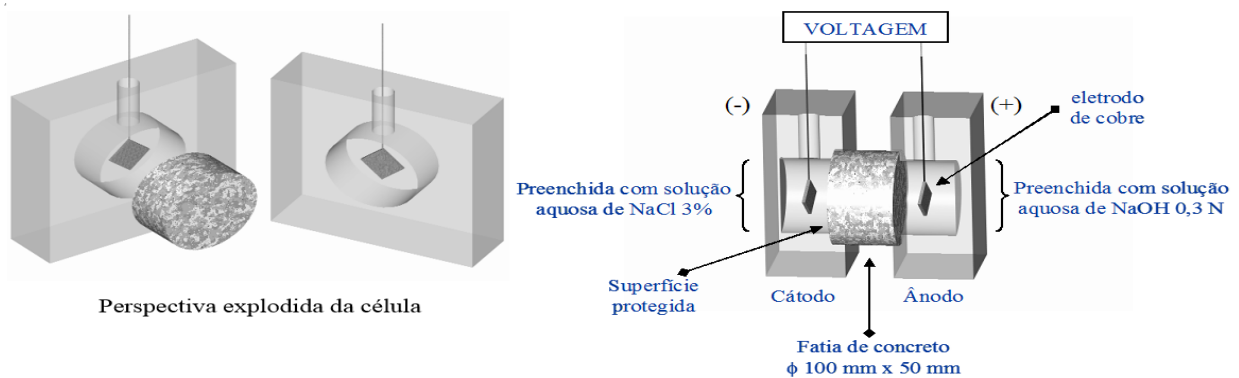


Figura 3. Arranjo experimental do ensaio de migração de cloretos.

Em seguida, as fatias foram fraturadas e a profundidade de penetração de cloretos livres foi determinada conforme ilustra a Figura 4. Andrade *et al.* (2000), comparando os métodos para determinação do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário utilizando o ensaio de migração acelerada, indicou que o ensaio preconizado por Nilsson & Luping (1992) apresentou uma melhor reprodutibilidade de resultados, justificando assim o método de ensaio apresentado neste artigo.



Figura 4. Fatia de corpos de prova após ruptura e aplicação de solução aquosa de  $0,1 \text{ M}$  de  $\text{AgNO}_3$ .

### 3. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta os resultados dos coeficientes de difusão determinados pelo método de Luping & Nilsson (1992) para concreto saturado, conforme o experimento foi realizado. Portanto, a movimentação de íons cloreto causada pelo efeito da absorção ou permeabilidade não existiu.

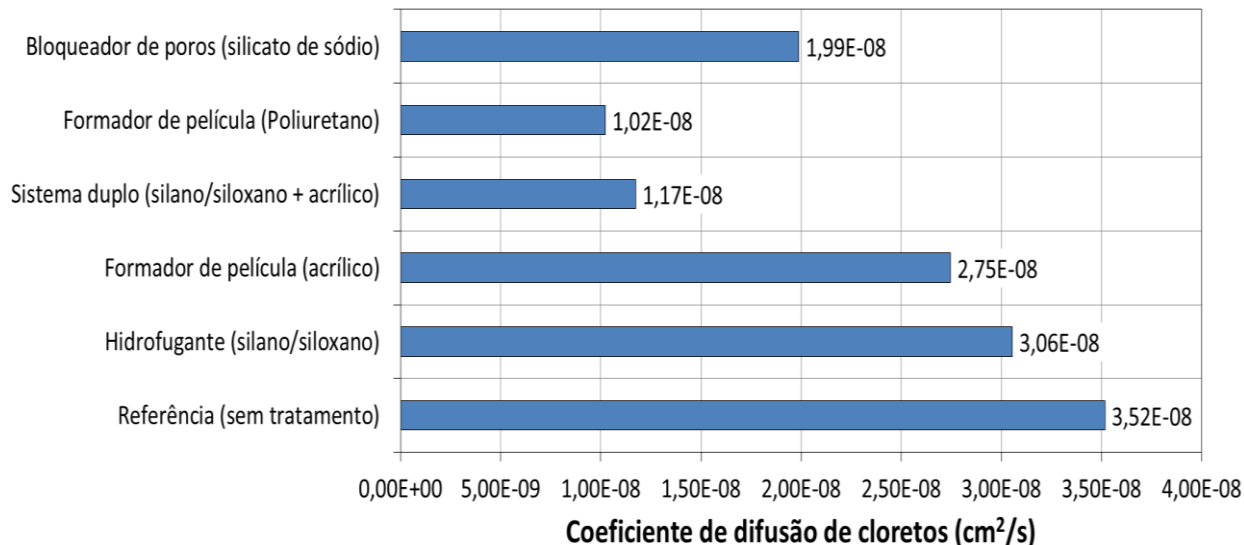


Figura 5. Coeficiente de difusão de cloretos para concretos com superfícies tratadas e não tratadas.

De maneira geral, os coeficientes de difusão das superfícies tratadas claramente reduziram. Essa redução aumenta a vida de serviço da estrutura quando exposta a um ambiente marinho. No entanto, houve uma grande diferença na eficiência, dependendo do tratamento utilizado.

É importante enfatizar que, exceto pelo revestimento de poliuretano, o sistema duplo (hidrofugante de superfície + revestimento acrílico) é muito mais vantajoso quando comparado com os sistemas únicos devido à barreira dupla formada nesta categoria de proteção. Isso ocorre porque, quando o íon cloreto passa a camada de acabamento acrílico, existe ainda o tratamento de silano/siloxano, que tem alguma capacidade para inibir a penetração de íons cloreto para o interior do concreto.

Em termos de funcionamento, os formadores de película de qualidade são mais eficientes porque agem como uma camada de separação da peça de concreto do contato com o meio externo. Este é o caso do poliuretano indicado na Figura 5. Por outro lado, os sistemas de poros abertos como os silicatos e hidrofugantes tendem a apresentar menor capacidade de proteção acompanhado de películas de baixa qualidade como é o caso do acrílico usado neste estudo.

A Tabela 5 mostra a taxa de redução dos coeficientes de difusão de cloretos de cada tratamento. O sistema duplo reduziu o coeficiente de difusão de cloretos em 67% em relação ao substrato de referência. O revestimento de poliuretano foi a proteção mais eficaz, reduzindo o coeficiente em 71%. É importante salientar que este resultado não pode ser universalmente considerado porque a eficiência do tratamento não depende só do tipo de resina que o compõe. Isto está de acordo com Vipulanandan e Liu (2005), que afirmam que para um tipo específico de resina a eficácia para reduzir a penetração de cloretos pode ser altamente distinta.

O silano/siloxano reduziu apenas em 13%, indicando que este material não exerce grande influência na penetração de cloretos. Porém, vale salientar que de acordo com Medeiros e Helene (2009), e Medeiros e Helene (2008), agentes hidrofóbicos reduzem significativamente a sortividade

do concreto, que é o mecanismo principal de proteção desse tipo de tratamento. Desse modo, quando se especifica um hidrofugante de superfície, o foco está em reduzir a sucção capilar, que pode transportar água contaminada por cloretos para o interior do concreto. Então, o ensaio de penetração de cloretos em condições de saturação do concreto e transporte de cloretos por migração não testa ou simula o ponto forte de atuação deste produto, embora tenha sido registrado 13% de redução no coeficiente de difusão de cloretos para este material. Medeiros *et al.* (2015) mostram em seu trabalho o uso da técnica de goniometria para testar a capacidade de hidrofugantes em aumentar o ângulo de contato da água com o substrato tratado, reduzindo a afinidade com a água e conferindo hidrorrepelência ao concreto.

Tabela 5. Porcentagem de redução de penetração de cloretos para cada sistema de proteção

Sistema de proteção	Taxa de redução do coeficiente de difusão de cloretos (%)
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. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A previsão de vida útil de estruturas de concreto armado é uma área que necessita de avanços. Atualmente, existem muitos modelos desenvolvidos, no entanto, suas validações ainda precisam ser mais estudadas e divulgadas.

Neste trabalho, é apresentada uma previsão do ingresso de cloretos baseado no estado não estacionário. O método proposto permite correlacionar o tempo de ingresso de cloretos a partir do cobrimento do concreto, o que pode ser uma ferramenta útil para conceber estruturas de concreto armado submetidas à condições de transporte de cloretos por migração e por difusão. A sua extrapolação a outros mecanismos de penetração, tais como absorção, convecção, ou uma mistura destes deve ser cuidadosa. É necessário realizar mais pesquisas sobre esses fenômenos para desenvolver essas considerações. Embora o modelo empregado ainda precise de melhorias, como a aplicação do fator de idade (aging factor) e a variação do  $C_s$  ao longo do tempo, sua aplicação é válida porque permite uma comparação quantitativa entre os diferentes materiais e produz uma estimativa de tempo de ingresso dos cloretos por difusão na rede de poros do concreto.

O método tem origem na segunda lei de Fick (Equação 3), cujo desenvolvimento está apresentado nas Equações de 3 a 5.

Helene (2000) também apresentou as Equações 4 e 5 baseadas na segunda lei de Fick. Estas equações foram utilizadas neste estudo para analisar os resultados dos coeficientes de difusão, permitindo a construção de um gráfico que correlaciona a profundidade de penetração de cloreto com o tempo (Figura 6).

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

Onde:  $C_{cl}$  = teor de cloretos na profundidade  $e_{cl}$ , no tempo  $t$  ( $C_{cl}$  em %);  $C_s$  = teor de cloretos na superfície do componente estrutural de concreto, admitido como constante (%);  $C_0$  = teor inicial de cloretos no interior do componente estrutural de concreto;  $D_{Cl}$  = Coeficiente de difusão de cloretos ( $cm^2/s$ );  $t$  = duração do tempo considerado (s);  $e_{cl}$  = profundidade atingida pela frente de cloretos com teor de cloretos igual a  $C_{Cl}$  (cm).

Considerando  $z$  uma incógnita qualquer (arbitrado a expressão dentro da função erf) e isolando  $e_{cl}$ , obtém-se a Equação 4.

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

Incluindo  $z$  na Equação 3 e isolando erf( $z$ ), chega-se na Equação 5.

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

Na construção da Figura 6 considerou-se  $C_0 = 0$ , ou seja, o concreto não tinha cloreto algum no momento da moldagem.

Fixando um valor para  $C_s$  e considerando  $C_{cl}$  igual ao limite crítico para a despassivação das armaduras por corrosão causada por ataque por cloretos, obtém-se a função erro de Gauss [erf( $z$ )]. Consultando tabelas que relacionam erf( $z$ ) com  $z$ , obtém-se o valor de  $z$ . Substituindo este valor de  $z$  e o coeficiente de difusão de cloretos na Equação 4, obtém-se uma equação que relaciona a profundidade em que o valor limite (para a despassivação das armaduras) é atingido com o tempo necessário para que isto ocorra. Este foi o raciocínio seguido para a elaboração da Figura 6.

É importante salientar que a previsão de tempo de ingresso de cloretos presente neste artigo é válida somente nas condições a seguir:

- A estrutura de concreto armado está no início da sua vida útil (a partir do período de iniciação);
- O agente de degradação mais rápido é o ataque por cloretos;
- Não há fatores externos acidentais que tenham afetado as propriedades do cobrimento de concreto;
- O teor limite de cloretos para a despassivação do aço é 0,4% em relação a massa de cimento e foi o escolhido porque é o especificado em alguns documentos técnicos importantes (Boletim 152, 1992; BS 8110-1, 1997; EN 206-Part 1, 2007).

É importante dar ênfase ao fato do coeficiente de difusão ter sido obtido por um processo de migração (por aplicação de uma ddp) em estado não estacionário, sendo, portanto, um parâmetro bastante diferente do transporte real de cloretos no concreto, o que restringe e limita sua aplicação direta em um modelo de previsão de vida útil. Porém, o uso de resultados comparativos dentro do experimento realizado é possível e coerente.

Apesar dos ciclos de variação da concentração de cloreto na superfície de concreto (De Coss et al., 1998), uma restrição deste trabalho foi a fixação da concentração de cloretos na superfície ( $C_s$ ) igual a 0,9%, que foi citado por Helene (1993) como adequado para concretos entre 20 e 30 MPa, relação água/cimento entre 0,48 e 0,68 e consumo de cimento entre 280 e 400 kg/m<sup>3</sup>, condição em que o concreto utilizado no experimento deste artigo se enquadra.

Outra simplificação do método é só considerar o processo de difusão na previsão de penetração de cloretos, desse modo, as previsões realizadas são mais adequadas para um concreto submerso em água do mar do que em estruturas submetidas a condições de proximidade com o mar.

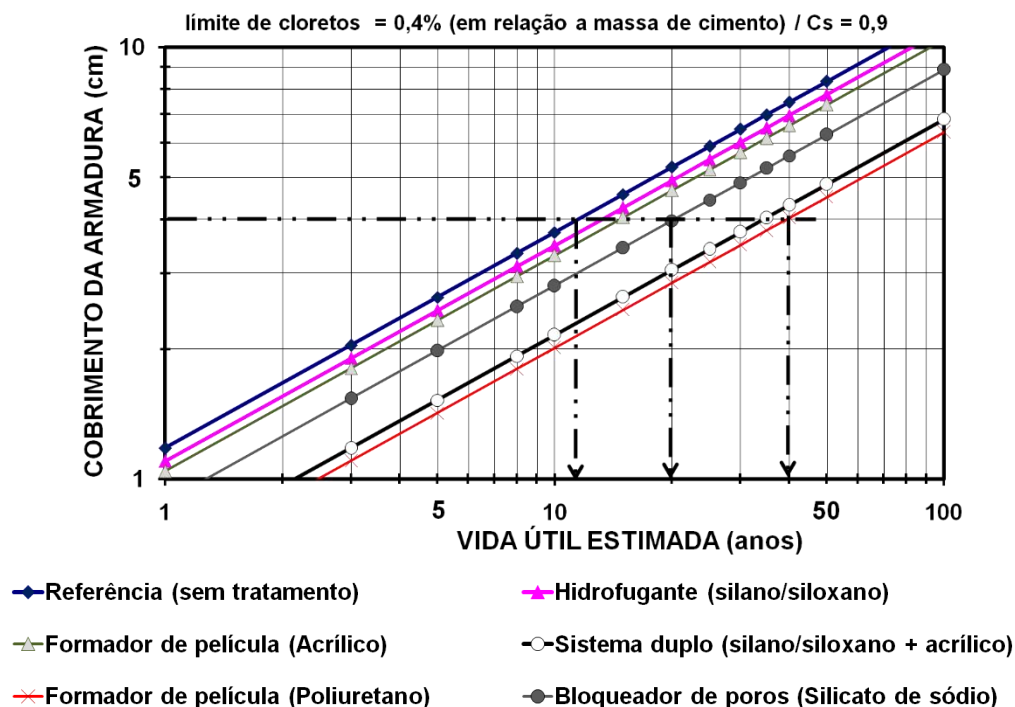


Figura 6. Relação entre a vida útil estimada e o cobrimento de concreto relativo à penetração de cloretos (profundidade onde 0,4% em massa de cimento foi atingido).

É possível observar na Figura 6 que para as estruturas com cobrimento igual a 4 cm, a vida útil estimada é em torno de 12 anos para o ingresso de cloretos por difusão, podendo alcançar até 40 anos dependendo do sistema de proteção aplicado (pode haver aumento no tempo de até três vezes). É importante enfatizar que a proteção de poliuretano (formador de película) e os sistemas duplos apresentaram melhores resultados do que os outros tratamentos testados neste estudo.

É importante relatar que Castellote e Andrade enfatizam que vários modelos de previsão de vida útil foram analisados em diferentes workshops dentro da RILEM TC 178-TMC e que inúmeras incertezas permanecem, o que impede, no atual estado da arte, de fazer exatas previsões em longo prazo baseado em experimentos de curta duração (Castellote, Andrade, 2006). Alguns anos se passaram desde 2006, porém, considera-se que tais incertezas ainda existem. Desse modo, as previsões de vida útil realizadas neste trabalho não devem ser interpretadas como valores precisos e absolutos, porque a metodologia tem elementos de contorno como ocorre em qualquer modelo de previsão de vida útil.

Uma boa maneira de pensar em termos de proteção de superfície foi proposta em Medeiros e Helene (2009), onde a proteção é representada em cobrimento equivalente, que consiste em quantos cm de cobertura de concreto é igual a um revestimento de um determinado sistema de proteção. Ou seja, se uma peça de concreto é protegida com um sistema de proteção que tem um cobrimento equivalente X cm, isso significa que é como se ela tivesse um acréscimo de cobrimento de X cm, desde que o sistema de proteção tenha suas propriedades de desempenho mantidas ao longo do tempo, que na prática só é obtido prevendo renovação e manutenção periódica da proteção de



superfície. Exemplificando: se o concreto armado for protegido com o formador de película base acrílico, é como se o cobrimento da armadura existente fosse acrescido em 5 mm.

A Figura 7 mostra o cobrimento equivalente para cada tratamento estudado. Esses dados estão relacionados com o concreto do substrato utilizado neste estudo.

Este tipo de raciocínio pode ser o caminho para fundamentar a aplicação de sistemas de proteção de superfície em condições em que a estrutura de concreto armado já esteja concluída e com espessura de cobrimento abaixo do especificado por norma. Este tipo de situação pode ser gerado nos casos de estruturas construídas com baixo controle de qualidade e em casos de estruturas construídas e não concluídas por motivos como a falência da construtora.

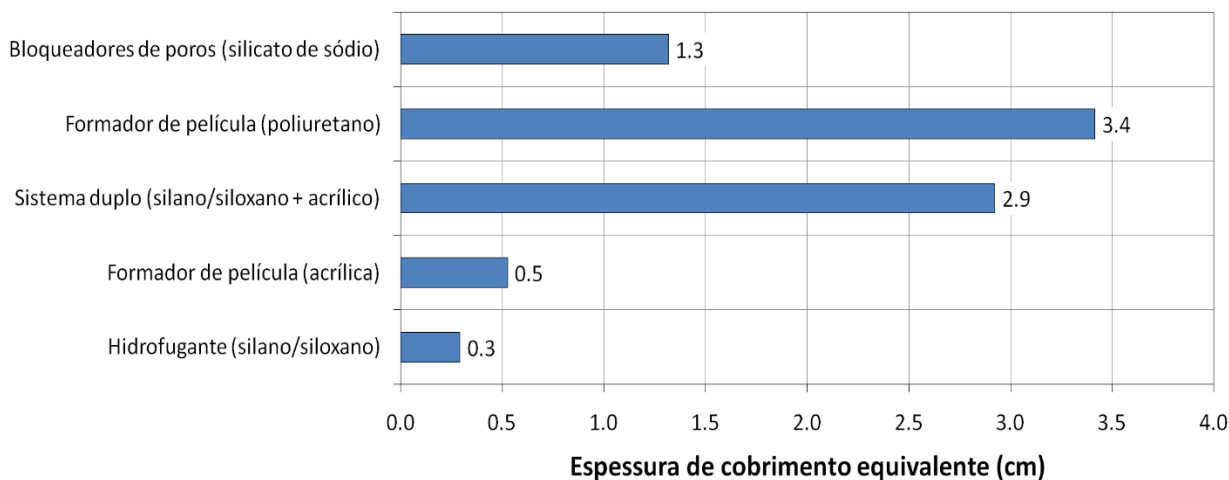


Figura 7: Espessura do cobrimento equivalente para cada sistema de proteção relacionado ao concreto do substrato –  $C_s = 0,9\%$  (coeficiente de difusão de cloretos pelo método de Luping e Nilsson, 1992).

## 5. CONCLUSÕES

As conclusões aqui expressas se aplicam às características deste trabalho e dos materiais empregados. Qualquer extrapolação para outros materiais ou circunstâncias deve ser realizada cuidadosamente.

A previsão de vida útil para o estágio de iniciação da corrosão do concreto com tratamentos de superfície foi obtida no estado de migração não estacionária e será válida apenas na fase de iniciação mencionada.

A contaminação por cloretos em uma estrutura de concreto armado exposto a um ambiente marinho é uma das maneiras de degradação mais difíceis de corrigir. A penetração de íons no concreto ocorre por difusão, por migração ou por penetração de água contaminada por cloretos. A partir da pesquisa aqui apresentada, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A proteção de superfície de concreto pode ser um meio eficiente de inibição da penetração de cloretos em concreto. Conseqüentemente, os sistemas de proteção devem ser usados para aumentar a vida útil do concreto armado em ambientes influenciados pela maresia, como prédios em cidades costeiras.
- Os resultados indicaram que o sistema de proteção mais eficiente pode reduzir o coeficiente de difusão de cloretos no concreto armado em 71%.

- É importante salientar que os resultados indicaram que a utilização de um sistema de proteção de elevada eficiência pode aumentar mais de três vezes a vida útil de uma estrutura de concreto armado. No entanto, esse nível de aumento na vida útil está relacionado às condições utilizadas neste trabalho e diferentes resultados podem ser obtidos em outras condições de ensaios.
- Gráficos (como a Figura 6) que relacionam a vida útil estimada com a profundidade em que a concentração de cloretos atingiu o limite de despassivação do aço são os meios mais eficazes e ilustrativos de apresentar os resultados dos coeficientes de difusão de cloretos.
- Os resultados deste artigo indicam que o hidrofugante de superfície reduziu em 13% a penetração de cloreto no concreto. No entanto, é importante ressaltar que este tratamento mostrou a menor capacidade de reduzir o coeficiente de difusão de cloretos.
- O revestimento de poliuretano e sistema de dupla proteção foram os tratamentos de superfície que apresentaram a melhor eficiência na redução da penetração de cloretos (71% e 67% de redução do coeficiente de difusão de cloretos, respectivamente).

Este trabalho propõe uma forma interessante de interpretar os resultados do coeficiente de difusão de cloretos. A possibilidade de fazer previsões de vida útil, facilidade de interpretação e correlação entre o cobrimento de concreto e a vida útil estimada são as vantagens deste método. Dessa forma, o procedimento de interpretação pode se tornar uma ferramenta importante para prever a vida útil das estruturas de concreto armado. No entanto, é importante observar que essa é uma aplicação baseada apenas no coeficiente de difusão obtido por um ensaio de migração de cloretos. Como considerar outros fenômenos ainda é desconhecido e precisa ser mais pesquisado para aprimorar a aproximação das estimativas de previsão de vida útil com a realidade.

Outro ponto positivo do trabalho é a conversão da capacidade de proteção do sistema de proteção com o cobrimento equivalente em concreto do substrato. Este tipo de abordagem possibilita inferir qual a espessura de cobrimento adicional que um dado sistema de proteção equivale. Porém, não se pode deixar de ressaltar que este tipo de conversão só é válido se for garantido que o material de proteção de superfície mantém suas propriedades de proteção ao longo do tempo de vida útil da estrutura a ser protegida e isso só ocorre se a renovação do sistema for sendo realizada periodicamente.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola Politécnica de São Paulo (POLI-USP), à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por tornar esse estudo possível e apoiá-lo financeiramente. Os autores também agradecem à arquiteta Dominique E. Giordano Gonzalez pelas ilustrações.

## 7. REFERÊNCIAS

- 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.
- Boletim 152 Durability of concrete structures. Comitê 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 – Especificação, performance, produção and conformidade. 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), 2nd edn., pp. 249.
- Helene, P. (1993), “*Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*”, Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 231.
- Helene, P. (2000), “*Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. Manual de Diagnosis 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 proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos 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.
- Tolêdo Filho, R. D., Ghavami, K., George, L. (2003), “*England and Karen Scrivener Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability*”, Cement and Concrete Composites, 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-Molina<sup>1</sup>, A. A. Torres-Acosta<sup>2</sup>, E. M. Alonso-Guzmán<sup>1</sup>, H. L. Chávez-García<sup>1</sup>, H. Hernández-Barrios<sup>3</sup>, C. Lara-Gómez<sup>1</sup>, W. Martínez-Alonso<sup>4</sup>, J. T. Pérez-Quiroz<sup>2</sup>, J. A. Bedolla-Arroyo<sup>5</sup>, F. M. González-Valdéz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cuerpo 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](mailto:eliamercedesalonso@gmail.com)

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

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

<sup>4</sup>Facultad 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.

<sup>5</sup>Facultad 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://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:** Recycled 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 correspondência: Elia Mercedes Alonso Guzmán

## 1. INTRODUÇÃO

Entre as diversas áreas do conhecimento, a preservação do meio ambiente é uma parte da engenharia civil que pode ser resolvida a partir da reciclagem de concreto, pois o seu uso: minimiza o descarte de resíduos sólidos que contaminam o meio ambiente, reutiliza materiais considerados como entulho, que não possuem em si um custo significativo, inova a concepção de materiais para se alcançar o máximo desempenho mecânico sob solicitações estáticas e dinâmicas para melhorar as condições de vida daqueles que usam os edifícios construídos com esses materiais; preserva o meio ambiente por evitar sua contaminação por resíduos sólidos, diminuem as emissões de COx no ar que todos respiramos e evita extrações desnecessárias de pedreiras, preservando a arquitetura da paisagem e da flora e fauna endêmicas.

Toda profissão do seu domínio específico do conhecimento tem a obrigação e responsabilidade moral de contribuir na medida do possível para melhorar e preservar o meio ambiente; de modo que a reciclagem de concreto é um tema de pesquisa fundamental para se evitar, como possível, o aquecimento global. Seu projeto, fabricação, durabilidade, desempenho, economia, viabilidade são pesquisados.

O emprego de materiais de construção reciclados tem origem no período pós-guerra, na década de 40 do século XX, pois a Europa possuía grandes quantidades de escombros resultantes dos bombardeios, que passaram a ser utilizados como materiais de reconstrução, com bons resultados. Os países mais devastados foram o Reino Unido e a Alemanha; as publicações da época, principalmente britânicas, alemãs e russas relatavam o uso dos escombros para a construção de novas obras civis, só que a maioria dos escombros eram materiais cerâmicos (ladrilhos, cerâmicas sanitárias), material pétreo natural, plásticos e borrachas ((Hoffmann et al, 2012, Kulakowski et al, 2012) e concreto; que posteriormente receberam adições como escórias, cinzas volantes, sílica ativa (González-Fonteboa et al, 2009). O concreto reciclado veio para a América no final do século XIX (Torres et al., 2014), e os EUA também começaram seus estudos no campo da reciclagem. O primeiro relatório sobre concreto reciclado foi feito na então União Soviética, por Gluzhge, P. em 1946, pouco tempo depois da 2ª Guerra Mundial.

Os primeiros estudos realizados nos EUA, posteriores aos estudos de Gluzhge, recomendaram em primeiro lugar empregar o concreto reciclado derivado da infraestrutura viária ou pavimento rígido, e somente em segundo lugar os originados de edificações residenciais, pois destacam que estes podem estar contaminados com produtos a base de enxofre, visto que o gesso é utilizado em revestimentos (sulfato de cálcio anidro ou semi-hidratado), podendo então causar ataque por sulfatos ao novo concreto, acarretando danos à sua armadura. O concreto reciclado era empregado principalmente em misturas de asfalto para pavimentação, substituindo os agregados pétreos, cujo problema era a falta de afinidade elétrica com materiais asfálticos (Harek et al., 1971; Buck, A., 1972).

Durante muito tempo, tinha-se a ideia de que as rochas naturais de natureza ácida (base sílica: ignimbritas, dacites, andesitas, plagioclasas, ortoclasas, quartzo, critobalita, tridimita, etc.) apresentavam carga elétrica superficial negativa, enquanto que as rochas naturais de caráter básico (os ferromagnesianos: basaltos) apresentavam cargas elétricas superficiais positivas. Pesquisas recentes destacam claramente que todos os agregados pétreos naturais (vulcânicos e triturados: arenitos, granitos, mármore, dacites, andesitas, riolitos, calcário, dolomita, quartzo, basaltos) possuem cargas elétricas negativas (Rodríguez Talavera et al., 2001).

O pensamento anterior era de se fazer misturas asfálticas com emulsões aniônicas e catiônicas, o que é de crucial importância para saber se haverá afinidade. Também tem sido elaborado concreto reciclado com resíduos de pneus em pavimentos asfálticos (Kardos et al., 2015). A

intensidade da carga superficial do agregado, combinado com a intensidade da carga do agente emulsivo, pode influir consideravelmente na velocidade de ruptura, particularmente no caso de emulsões catiônicas. Íons de cálcio e de magnésio presentes na superfície do agregado podem reagir com – e desestabilizar – certas emulsões aniônicas, acelerando a ruptura da emulsão (Carrasco, 2004). Este problema da afinidade elétrica superficial não ocorre nos casos de concreto reciclado com materiais cerâmicos.

## 2. ANTECEDENTES

Conseguir que materiais considerados como entulhos (lixo, resíduos), como é o caso do concreto demolido ou colapsado, sejam reutilizados na elaboração de novas misturas de concreto, resolve entre outros objetivos: (A) reutilização de resíduos sólidos, reduzindo a quantidade de resíduos ou entulhos que agridem o meio ambiente e conseqüentemente os seres humanos, como por exemplo, o problema dos líquidos lixiviados; (B) projeto, inovação e elaboração de novos materiais de construção ecoeficientes; (C) conservação de matérias-primas e suas jazidas, resultando na não exploração e na preservação do habitat natural da flora e fauna nativa, conservação da arquitetura da paisagem, geoparques. Os recursos minerais não são renováveis; (D) diminuição da contaminação atmosférica, dando um novo uso a um material que durante sua produção emitiu CO e CO<sub>2</sub>.

A produção de agregados pétreos vulcânicos, como os regionais em Michoacán, México, por se tratar de rochas ígneas extrusivas, implica que são produtos de eventos vulcânicos e os derrames magmáticos são fontes de emissões de óxidos de enxofre, SO<sub>x</sub>. A atividade vulcânica se constitui uma importante fonte de emissões de SO<sub>x</sub> à atmosfera, sendo a principal fonte de enxofre a estratosfera (Amigo Ramos, 2000; López et al., 2015; Ruggieri, 2012). Os compostos CO e CO<sub>2</sub> são materiais que, por fotossíntese, podem se converter em O<sub>2</sub>, porém não há um processo que absorva compostos de enxofre produzindo oxigênio.

A fabricação de CP produz, aproximadamente, o mesmo peso em compostos de carbono liberados à atmosfera, como o CO e CO<sub>2</sub>, portanto o concreto reciclado também reduz a pegada de carbono na atmosfera. A América Latina não é conhecida por sua grande contribuição para a poluição global.

No México, em 2002, a principal fonte de gases de efeito estufa foi o setor de energia, responsável por cerca de 70% das emissões. Outros processos industriais, como a produção do cimento, vidro, aço, papel, alimentos e bebidas, entre outros, contribuíram com cerca de 9% das emissões de gases de efeito estufa do país (Cambio Climático, 2009). 40% do dióxido de carbono produzido por uma família regular vêm de veículos automotivos movidos por combustíveis fósseis e da construção de residências (<https://www.veoverde.com/2014/01/llegaron-las-viviendas-sustentables-a-mexico/>).

O concreto é um dos materiais mais amplamente produzidos e utilizados no mundo, na construção de obras civis e também militares, mas é também um gerador de grandes quantidades de resíduos sólidos associados com os processos de demolição e desperdício (Valdés et al., 2011). Para minimizar a mudança climática e a poluição ambiental, iniciou-se a assinatura do Protocolo de Quioto, que foi negociado em 1997 e entrou em vigor em 2005. O protocolo estabelecia que 37 países desenvolvidos reduzissem suas emissões de gases de efeito estufa em 5% até 2012, em relação aos seus níveis de emissões de 1990. O México, por não ser considerado um país desenvolvido, não o assinou.

O protocolo determinou que países desenvolvidos ao menos iniciassem políticas cujo foco seria a redução destes volumes de poluentes para a atmosfera, que também constitui um patrimônio de

todos (Alonso et al., 2007) através da reutilização, redução ou buscando outras alternativas de reciclagem (Debieb e Kenai, 2008; Rolón et al., 2007; G. Valdés et al., 2009). Estudos realizados na União Européia (Etxeberria et al., 2007; Vázquez, E. et al., 2004; [http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO\\_1.pdf](http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf); Jianzhuang et al., 2012; <http://www.concretosrecicladados.com.mx/>; <http://www.veoverde.com/2013/11/concretos-recicladados-otra-apuesta-mexicana-por-el-ambiente/>) estabeleceram que a produção de resíduos da construção é de cerca de 900 milhões de toneladas/ano, conforme o exposto na Tabela 1. Estudos na Espanha, Alemanha, França e Inglaterra, países com escassez em jazidas de agregados pétreos, puderam determinar a viabilidade de se reutilizar o concreto procedente da construção como material granular, especialmente se houver uma falta dos mesmos. A busca por uma baixa demanda de combustíveis fósseis para a sua fabricação, transporte e reciclagem diminui a energia necessária à sua reutilização.

Observa-se que em relação à quantidade de produtos reciclados per capita, a Austrália se destaca com a melhor proporção, 25,78ton/habitante. Quanto à quantidade de concreto reciclado em função do território do país em questão, teoricamente, um maior território corresponderia a uma quantidade maior de obras da construção civil e, portanto, maior quantidade de resíduos; o Taiwan está, no entanto, com 1862,15 toneladas por km<sup>2</sup> de território, o maior índice encontrado nesta pesquisa. Também não se pode esquecer que muitos países ainda não têm um registro confiável.

Tem-se observado terremotos que assolaram países como a Turquia, Afeganistão, Nepal, mas não há registros na literatura indexada das quantidades de concreto utilizadas para reciclagem, sem esquecer tampouco que nestes países continua forte a tradição do uso de paredes de cerâmica e/ou adobe, com maiores módulos de elasticidade para absorção de energia dinâmica.

Estima-se que a produção anual de concreto seja de 25 bilhões de toneladas por ano. Devido à poluição ambiental e às alterações climáticas, torna-se importante iniciar a formação de uma consciência coletiva em países menos desenvolvidos a fim de reduzir a extração de materiais pétreos de ambientes naturais, reduzindo assim o esgotamento acelerado das reservas dos agregados provenientes tanto dos leitos de rios como das pedreiras (Rakshvir and Barai, 2006; Montoya et al., 2005). A demanda por recursos naturais e a escassez de matérias-primas é importante; portanto, a necessidade de preservar e proteger o meio ambiente de uma crise ecológica faz com que a técnica do concreto reciclado (Oikonomou, 2005) seja uma atividade de grande importância na construção (Aguilar et al., 2005).

Pesquisas anteriores mostraram que as propriedades físicas e mecânicas dos concretos reciclados, composto por adições de agregados reciclados em sua matriz, podem garantir a sua resistência e desempenho mecânico (Topcu, 1997; Topcu & Sengel, 2004; Topcu & Guncan, 1995). Estudos derivados de aplicações específicas em obras civis mostram que muitas vezes o resíduo de concreto não é suficiente e nem utilizado de forma eficiente. Este resíduo de concreto pode também ser usado para produzir elementos de concreto pré-fabricados, como blocos, materiais de isolamento, materiais leves e painéis.



Tabela 1. Resumo de concreto reciclado. 1 – Milhões de toneladas de concreto reciclado (CSI Recycling Concrete Full Report 2007); 2 – Território do país em km<sup>2</sup>; 3 – Habitantes em milhões; 4 – Relação de concreto reciclado em milhões de tonelada per capita e 5 – Relação de toneladas de concreto reciclado produzidas por km<sup>2</sup> de território.

País	1	2	3	4	5
Alemanha	120.00	357,121	80	1.5	336.02
Argentina	5.50	2 780 400	43	0.13	1.99
Austrália	550.00	7,692,024	21.5	25.58	71.50
Áustria	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
Colômbia	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
Espanha	39.00	504,645	47.1	0.83	77.28
Finlândia	1.60	337,030	5.4	0.3	4.74
França	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
Itália	40.00	301,338	59.4	0.67	132.74
Japão	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
Suíça	7.00	41,290	7.9	0.89	169.53
Suécia	1.20	449,964	9.6	0.13	2.67
Taiwan	67.00	35,980	23.1	2.9	1862.15
Tailândia	10.00	513,115	65.5	0.15	19.49
Mundial	900.00	150,386,640	7000	0.13	5.98

O método para diminuir o tamanho do concreto endurecido para se obter britas, pode produzir perdas por pulverização, na forma de agregados com tamanhos  $\leq \frac{1}{4}$  de polegada (6,4 mm), zonas porosas com suas correspondentes formas, tamanhos e distribuição dos poros nas matrizes, o que aumenta a área superficial e conseqüentemente a demanda de CP na nova mistura (Kou et al., 2011, Gómez-Soberon, 2012); morfologia indesejável das partículas trituradas, onde as

dimensões em relação aos eixos X, Y e Z são muito diferentes entre si, produzindo formas alongadas ou semicirculares (Eguchi et al, 2007). Para evitar que os agregados no concreto reciclado apresentem problemas como os descritos, o produto da moagem fina e grossa deve ser caracterizado para a elaboração de traços otimizados; alguns países já possuem norma para pedras recicladas (Martín-Morales et al., 2011).

Outro parâmetro a considerar é a porcentagem de pedra natural, que pode ser substituída por material reciclado (Etxeberria et al., 2007), o consumo de cimento por m<sup>3</sup> do concreto e a resistência mecânica dependem desta porcentagem (Marie and Quiasrawi, 2012), algumas misturas somente substituem os agregados graúdos por material reciclado, outras somente substituem os agregados miúdos por material reciclado (Evangelista y Brito, 2007; Raoa et al, 2007), a qualidade e as propriedades dos agregados dependem do leito de rocha ou do concreto de onde provêm, quanto maior a resistência do concreto original, maior será também a resistência dos agregados reciclados deste concreto (Kou et al., 2012), porém também existe a possibilidade de que os concretos primários tenham origens distintas; outros traços empregam ambos os tipos de agregado reciclado, alguns autores trabalham com porcentagens específicas de cada agregado (Mas et al., 2012). As alterações são dosadas e elaboradas de acordo com a as propriedades mecânicas de projeto necessárias ao concreto reciclado (Padmini et al., 2009; Tabsh y Abdelfatah, 2009).

O consumo de CP depende do método de dosagem, do valor do desvio padrão da produção de concreto utilizado, do tipo de material, do coeficiente sísmico, da qualidade do solo e do uso da edificação. Não existem métodos de dosagem conhecidos universalmente para elaborar argamassas ou concretos com agregados provenientes do concreto reciclado, mas tem-se elaborado com êxito argamassas com material reciclado (Abbas et al., 2009).

A dosagem de traços de concreto teve início no final do século XIX e início do século XX com o Duffy Abrams (Abrams, 1919). Até o final do século XX, o concreto era elaborado primordialmente com base na resistência mecânica à compressão, que é a propriedade referência do concreto, porém desde o início do século XXI esta premissa foi alterada, e devido o desempenho do concreto, a sua vida útil, a diminuição na necessidade de manutenção, a elaboração de traços de concreto passaram a contemplar também os critérios de durabilidade (Kwan et al., 2012; López Celis et al., 2006 ) sendo identificados como parâmetros a quantificar a resistividade e a velocidade do pulso ultrassônico.

Os traços de concreto com material reciclado são avaliados do ponto de vista do desempenho mecânico, desempenho físico, durabilidade (Casuccio et al., 2008), configuração de ruptura (Liu et al., 2011), fluidez, trabalhabilidade e abatimento (Guneyisi, 2010), idade e hidratação do cimento (Katz, 2003), grau de compactação do concreto, que pode ser alcançado com métodos vibratórios ou com concretos especiais autoadensáveis (Kou et al 2009).

Normalmente, o desempenho mecânico é avaliado através do ensaio de resistência à compressão simples (Xiaoa et al., 2005) em amostras cilíndricas ou cúbicas, mas se as arestas/lado das amostras apresentarem dimensões inferiores a 10cm, pode-se empregar nestas amostras, sem necessidade de preparo ou acabamento, o método de Point Load, tração simples e indireta, flexão ou módulo de ruptura. O módulo de ruptura é o valor de referência para o caso de projetos de pavimentos rígidos (Lye et al, 2016). A avaliação do concreto reciclado também é realizada com o emprego de métodos de ensaio não destrutivos, que não demandam o preparo do material, podem ser repetidos e não provocam danos ao mesmo; os ensaios de resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico são os mais empregados (Park et al., 2005). Para melhorar o desempenho das misturas de concretos são utilizados traços com fatores de segurança, menores relações a/c; cura prolongada por imersão ou aspersão (Fonseca et al., 2011). Outra maneira de influenciar a modificação das propriedades do concreto reciclado é a utilização de aditivos e de

adições ou substituições de cimento por materiais com atividade pozolânica. Podem-se elaborar concretos ativados alcalinamente com agregados originados na reciclagem do concreto (Kathirvel et al., 2016).

### 3. ATUALIDADE

O problema mais comum atualmente é relativo às emissões de gases de efeito estufa e as ações realizadas para possivelmente diminuí-las.

De diversas maneiras se está estudando propostas que contribuam para a redução das emissões e dos resíduos para a atmosfera.

O desempenho da elaboração de concretos empregando britas originadas da reciclagem do concreto tem sido em geral suficiente para produzir um novo material cujo desempenho mecânico e durabilidade atendam às prescrições normativas internacionais. Talvez sua principal desvantagem possa ser considerada a porosidade dos agregados graúdos e miúdos produzidos por trituração, o que pode ser solucionado tendo em conta para o estudo de novas misturas: 1º - A diminuição da relação água/cimento, que favorece a durabilidade e a obtenção da resistência mecânica necessária, porém esta premissa demanda o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes ou redutores de água (aditivos indicados no ASTM C-494) que permitam obter misturas com trabalhabilidade e fluidas. 2º - O emprego de resíduos agro-industrial que apresentem atividade pozolânica, ricos em aluminossilicatos, que "preenchem" os vazios da pasta endurecida (recristalizem os poros, densificando a matriz), os oxalatos de cálcio, como a wewellita e o weddellite, têm mostrado que realizam a mesma função como adições ao concreto.

A hidratação e endurecimento de concreto continuam ao longo do tempo, onde se destacam contêncões de concreto reciclado provenientes do concreto de uma construção da década de 60 demolida em 2011, que permaneceu sujeito às ações das intempéries durante os períodos de chuvas, formando novas ligas entre eles, solidificando-se e tornando difícil a sua ruptura com as mãos. O uso de resíduos com atividade pozolânica soluciona também, de forma indireta, o acúmulo de outros resíduos sólidos que contaminam e ocupam espaços; o emprego de adições ricas em silicoaluminatos que aumentam o desempenho mecânico das novas misturas; traços que aumentam a proteção da armadura ao se densificar, diminuindo o ataque por carbonatação nos concretos e, conseqüentemente, a corrosão das armaduras; outras maneiras de se evitar a corrosão das armaduras dos concretos é o uso de aço inoxidável, que é economicamente viável e reduz os custos de manutenção, aumentando a durabilidade (Pérez Quiroz et al., 2014).

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas com as adições, substituições e aditivos empregados nas novas misturas de concreto e argamassa base cimento e cal, no estado fresco e endurecido, mostram a veracidade destas afirmações (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); e 3º - A adição de produtos pozolânicos químicos de grau de pureza industrial que podem ser ativados a temperaturas amenas; os materiais geopoliméricos (Rubio et al., Patente 2014; Rojas, 2013; Medina, 2011) ou materiais alcalinamente ativados.

Atualmente, experimentam-se resíduos sólidos múltiplos como agregados, que podem ter origens orgânicas, como fibras, cascas e sementes; adições que são resíduos de outros processos industriais, tais como a cinza de bagaço de cana, cinzas de carvão mineral, cinzas de processamento de materiais cerâmicos artesanais feitos de argila, escória da produção metalúrgica e siderúrgica.

## **4. DISCUSSÃO**

A Tabela 1 mostra que a Austrália é o país que recicla em maior quantidade de toneladas per capita, enquanto que o Taiwan é o país que, devido o seu território, recicla mais toneladas de concreto; na mesma tabela, que contém os dados de 28 países, o México ocupa o 11º, indicando que estamos longe de utilizar todo o nosso potencial de concreto demolido, mas o esforço é significativo e mantido, e compartilhado pela comunidade.

O uso de concreto reciclado é mais comum na Europa, talvez devido à escassez de agregados minerais naturais. Na América Latina, especificamente no México, caso que conhecemos um pouco mais, está se buscando o uso contínuo de materiais considerados como resíduos sólidos para permitir respostas à conservação do meio ambiente, a busca e inovação de adições, métodos, técnicas e processos que melhorem as propriedades mecânicas do concreto reciclado.

Outro ponto a destacar é o contínuo estudo realizado sobre as novas tendências de dosagem de concreto por índice de durabilidade, para aumentar a vida útil das estruturas de concreto, levando à possível diminuição na demolição de concreto.

A reutilização de resíduos sólidos tem permitido encontrar propriedades sobre os mesmos que têm permitido o seu uso em traços de concreto/argamassa, modificando algumas de suas propriedades a favor da durabilidade.

## **5. REFLEXÕES**

O emprego do material reciclado evita o acúmulo de concreto colapsado ou demolido, que necessite ser removido ou transportado para aterros de resíduos sólidos, com o consequente custo do combustível para o transporte. O acúmulo destes resíduos sólidos também tem provocado alterações na arquitetura da paisagem ao modificar a morfologia da superfície ou topografia das áreas de destinação do material demolido.

O uso de agregados reciclados permite diminuir a quantidade de emissões contaminantes ao meio ambiente.

O material reciclado permite que as jazidas não sejam sobreexploradas desnecessariamente, preservando, tanto quanto possível, a arquitetura da paisagem e fomentando o turismo geológico especializado, que envolve a preservação da biota endêmica, diminuindo o impacto ambiental das extrações e as falhas por deslizamento dos bancos de material próximos dos centros populacionais, assim como as recargas dos aquíferos.

## **6. CONCLUSÕES**

A reciclagem do concreto soluciona a falta de agregados pétreos e a proteção de suas jazidas, também resolve se os agregados não cumprem com as normas vigentes, como o caso de espuma vulcânica ou pumicitas. A utilização de agregados de concreto reciclado também permite a cura interna das novas misturas de concreto, quando adicionados saturados.

O agregado pétreo obtido como resultado da demolição do concreto pode não apresentar as condições ideais, mas também existe a realidade de que muitos agregados pétreos minerais naturais existentes na região não atendem a todas as recomendações existentes nas normas de construção vigentes, e os construtores, engenheiros e arquitetos buscam maneiras de se extrair o maior proveito possível, alcançando um desempenho mecânico significativo.

Ainda há muito que se estudar sobre agregados reciclados, mas é possível obter um desempenho de 35MPa em concretos reciclados, se a brita for dosada, as relações a/c forem reduzidas, se forem adicionados aditivos para alterar a reologia das misturas no estado fresco para possibilitar o seu lançamento e que simultaneamente permitam alcançar a resistência.

Concomitantemente ao projeto e elaboração do concreto reciclado, deve ser explorada a possibilidade de se adicionar outros materiais que modifiquem as propriedades dos concretos em questão, alcançando condições econômicas e de sucesso.

A fim de evitar as emissões de carbono, interromper a construção seria o equivalente a diminuir a infraestrutura e conforto dos habitantes de um país, mas não fazer nada nos faz cúmplices de alguma forma, e é por isso que se buscam alternativas para a produção de materiais de construção que resultam da utilização de materiais que se tornaram entulhos, lixo e resíduos industriais, e encoraja-nos a continuar buscando alternativas de modificação das propriedades de novos materiais.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da Coordenação de Investigação Científica da Universidade Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; do programa de redes Temáticas do Programa de Aperfeiçoamento do Professor, Promep, da Secretaria de Educação Pública, SEP com o projeto intitulado: Red temática Promep para a Conservação de Materiais de Interesse Histórico e Artístico. Também se agradece pelas bolsas de estudo das Fundações Exxon Modile, Telmex, ICA e do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia, Conacyt.

## 8. REFERÊNCIAS

- 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](http://www.wbcd.org) y [www.wbcdcement.org](http://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
- Etxeberria, 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
- Figuroa 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-Fonteboá, 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](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. Quiasrawi, 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. Martínez Molina, E. M. Alonso Guzman, F. A. Velasco Avalos, 2014, PATENTE Geopolímero Fotoluminiscente, MX 2008001086 A1
- Ruggieri F., J. L. Fernández-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