



## 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, CII-Z-32 (cimento Portland composto com pozolana), CIII-40 (cimento Portland de alto-forno) e CIV-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 à 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).

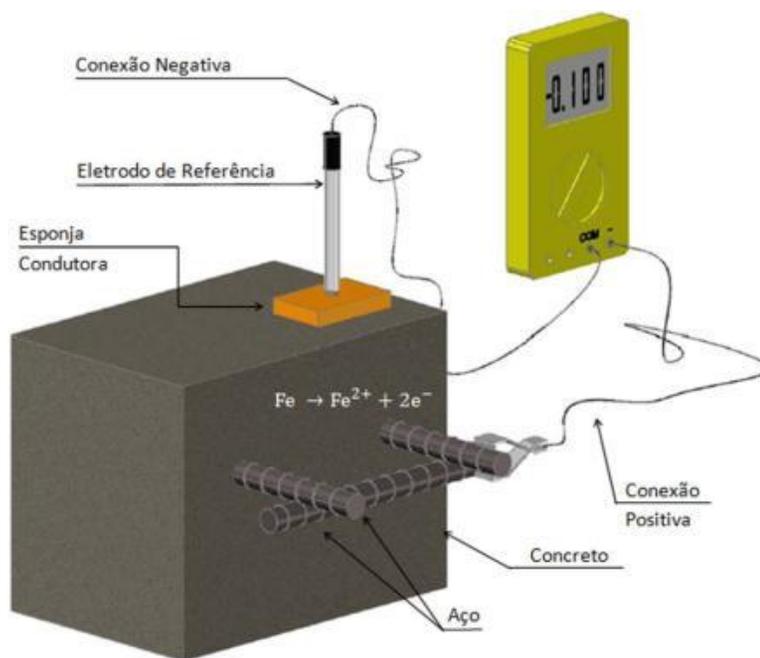


Figura 1. Configuração do circuito para determinação do potencial de corrosão (ROCHA, 2012; MEDEIROS et al., 2013)

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

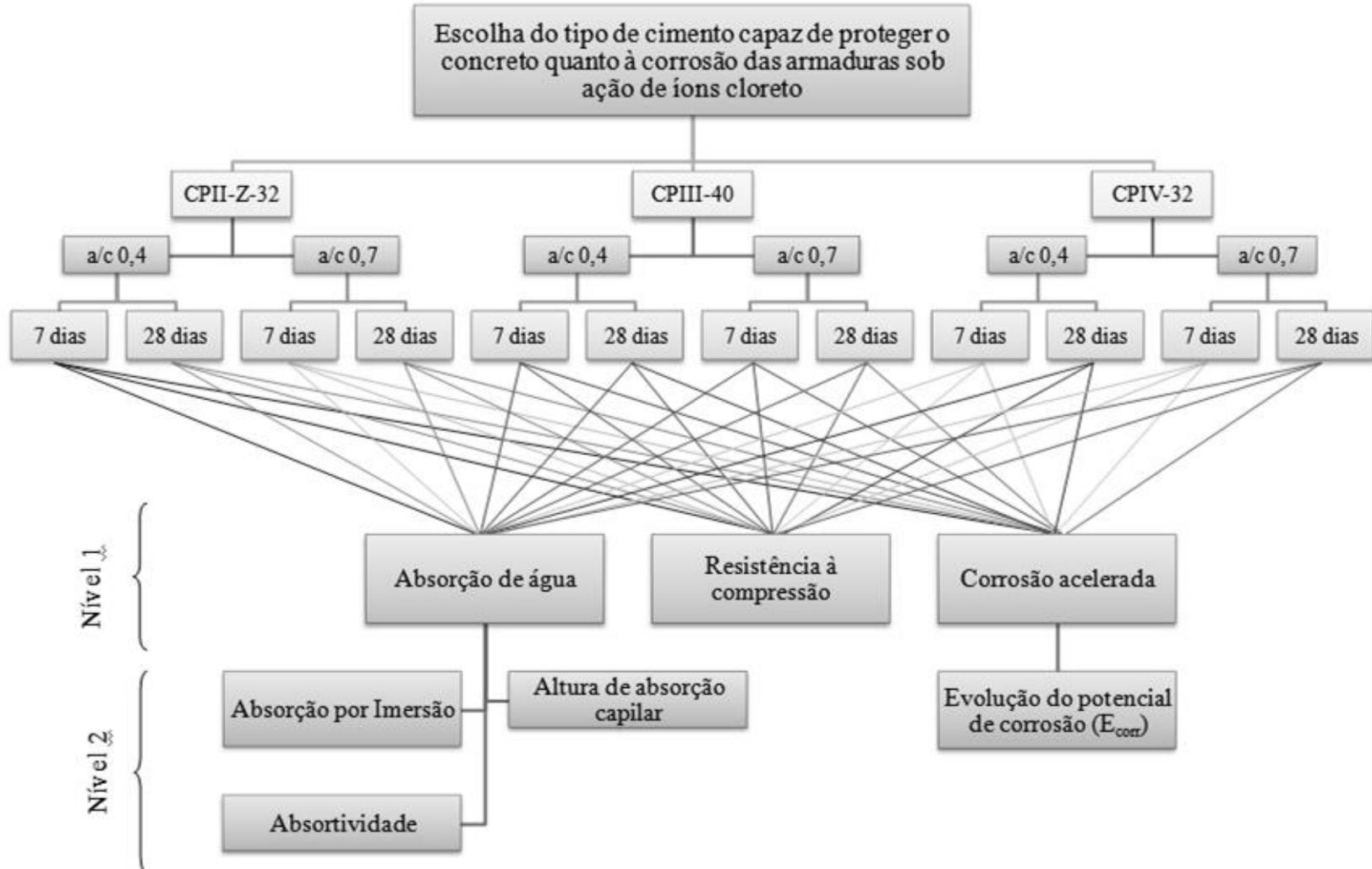
	Absorção de água	Resistência à compressão	Corrosão acelerada	Total da linha (Tl)	Importância relativa
Absorção de água	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Resistência à compressão	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Corrosão acelerada	3,00	3,00	1,00	7,00	0,60
Total geral (Tg)				11,67	1,00

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	
Tempo de cura	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 ( $Kg/m^2h^{1/2}$ )	1,27	1,93	1,14	1,87	0,97	1,37	0,89	1,24	1,26	1,72	0,98	1,48
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 CPII-Z-32 e CPIV-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.