Resistência à corrosão de telhas protendidas pré-fabricadas de concreto: uma aplicação de análise hierárquica

Lígia Vitória Real¹, Marcelo Henrique Farias de Medeiros²

¹ Doutoranda, Universidade de São Paulo, ligiaivr@gmail.com

² Professor Doutor, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: As telhas pré-fabricadas de concreto protendido são constantemente expostas a intempéries, como chuvas, radiação solar e ventos, intensificando os ciclos de molhagem e secagem a que estão submetidas. São elementos estruturais esbeltos e que, devido ao processo produtivo, possuem baixas espessuras (de 5 a 7 cm). Além disso, essas peças podem ser aplicadas em estruturas expostas a diferentes classes de agressividade, tais como indústrias, ambientes urbanos ou próximos ao mar. Para garantir a durabilidade das telhas quanto à corrosão das armaduras, torna-se necessário adequar o concreto conforme a agressividade do local onde a edificação for construída. Assim, o objetivo desse trabalho foi determinar através da análise hierárquica (AHP) qual traço de concreto garante maior resistência à corrosão às telhas pré-fabricadas para duas classes distintas de agressividade; moderada (localizada em Curitiba/PR) e forte (localizada em Paranaguá/PR). Para isso, foram comparados custo, absorção de água por imersão e por capilaridade, penetração de água sob pressão, porosimetria por intrusão de mercúrio, consumo de cimento, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação entre cinco concretos distintos, compostos com metacaulim, fíler e aditivo impermeabilizante. Os resultados apresentaram que, para os parâmetros avaliados nesta pesquisa, o traço com adição de metacaulim foi o mais resistente à corrosão para as duas classes de agressividade avaliadas.

Palavras-chave: telhas pré-fabricadas, concreto, corrosão, análise hierárquica.

Abstract: Prestressed precast concrete roof tiles are constantly exposed to inclement weather such as rainfall, solar radiation and wind, making the wetting and drying cycles worse. They are slender structural elements that, due to the productive process, have low thicknesses (around 5 cm). In addition, these pieces can be applied in structures exposed to different classes of aggressiveness, such as industries and urban environments or near the sea. In order to guarantee the durability of the roofing tiles as regards the corrosion of the reinforcement, it is necessary to adjust the concrete according to the aggressiveness of the place where the building is placed. Thus, the objective of this work was to determine through analytic hierarchic process (AHP) which mix design of concrete guarantees greater resistance to corrosion of the precast concrete roof tiles for two different Brazilian's classes of aggressiveness: moderate (Curitiba/PR) and strong (Paranaguá/PR). For this, five different mixes designs of concrete, composed with metakaolin, filler or waterproofing additive were analyzed in relation of cost, water absorption by immersion and by capillarity, penetration of water under pressure, porosimetry by mercury intrusion, cement consumption, chloride penetration and carbonation depth. For the parameters evaluated in this research, the results showed that the mix design trace with addition of metakaolin was the most resistant to corrosion for the two classes of aggressiveness evaluated.

Keywords: precast roof tiles, concrete, corrosion, analytic hierarchic process

1. Introdução

As telhas pré-fabricadas de concreto protendido possuem a função de cobertura das estruturas, bem como de captação e condução da água pluvial diretamente às vigas-calhas e destas, para tubos condutores, embutidos ou não nos pilares [1]. Essas peças estão constantemente expostas a intempéries, como chuvas, radiação solar e ventos, intensificando os ciclos de molhagem e secagem a que estão submetidas. Nas telhas tipo “W” (Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o escoamento é assegurado pela contra-flecha existente devido à protensão [2]. Portanto, para manter a inclinação necessária é imprescindível garantir o módulo de elasticidade do concreto e o alongamento do aço de protensão ao longo de sua vida útil. Além disso, essas peças são elementos esbeltos e que, devido ao processo produtivo possuem baixas espessuras; de 5 a 7 cm. As telhas pré-fabricadas são fabricadas com formas deslizantes (máquinas moldadoras) que se deslocam ao longo de formas metálicas autoportantes [3].

Figura 1: Seções telhas “W” [4]

Essas pequenas espessuras associadas à porosidade excessiva do concreto e a existência de microfissuras, tanto devido à retração por secagem quanto aos esforços devido à movimentação das peças, tornam as telhas mais suscetíveis à penetração de agentes agressivos [2], tais como o gás carbônico e os íons cloreto.

A durabilidade das edificações consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início da elaboração do projeto [5]. É o resultado da interação da estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Não é uma propriedade intrínseca a estrutura ou ao concreto [6; 7]. Assim, uma mesma estrutura ou peça exposta a diferentes classes de agressividade pode exigir características distintas para garantir suas características ao longo de sua vida útil.

Em geral, as indústrias de pré-fabricados de concreto atuam distribuindo peças e montando obras em regiões com características diferentes às do local onde a planta de produção se localiza. Uma fábrica pode, por exemplo, situar-se em uma região urbana e fornecer peças a região litorânea.

Considerando o exposto acima, o objetivo deste trabalho é avaliar dentre cinco traços de concreto, através da ferramenta de análise hierárquica, qual o mais adequado para garantir resistência à corrosão de telhas pré-fabricadas expostas a duas classes distintas de agressividade: moderada, em Curitiba/PR, e forte, em Paranaguá/PR (Tabela 1).

Tabela 1: Classes de agressividade [5]

Classe	Agressividade	Classificação	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural ou submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha ou industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial ou respingos de maré	Elevado

2. Aplicação da análise hierárquica

A Análise Hierárquica, ou Analytic Hierarchic Process (AHP), foi desenvolvida por Saaty no início dos anos 70 [8]. Ao se tomar decisões, as escalas de prioridade de cada alternativa são definidas com bases em julgamentos subjetivos, que refletem as considerações pessoais do tomador de decisão. Com a AHP, esses julgamentos são expressos quantitativamente. Após a aplicação das regras propostas pela técnica, o que foi primeiramente interpretado subjetivamente passa a ser um número objetivo que representa a prioridade de cada alternativa [9].

Na Engenharia Civil, AHP tem sido utilizada quando se é necessário fazer escolhas, como por exemplo, de agregados reciclados ou naturais [10; 11], do material para reforço ou reparo de estruturas [12; 13], de locais para implantação de barragens de rejeito [14], da alternativa mais adequada para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares [15] ou na determinação do processo de orçamento de edifícios públicos [16].

Além de ser metodologicamente sólida, a AHP é amigável e de fácil aplicação. A análise é baseada em uma hierarquia ou estrutura organizacional. Todas as entradas de dados para aplicação da técnica consistem em comparações entre apenas dois elementos, permitindo decisões pontuais. A saída é baseada em escalas simples derivadas das combinações em pares. Além disso, avalia-se a consistência dos julgamentos, que tanto verifica a confiabilidade da análise, quanto reduz a chance de se cometer um erro processual [17].

O método baseia-se em três etapas de pensamento analítico [8; 10; 18]: construção de hierarquias (definindo alternativas e critérios para a tomada de decisão); definição de prioridades e; consistência lógica do modelo de priorização.

2.1 Construção de hierarquias

O objetivo deste artigo é avaliar dentre cinco traços de concreto qual o mais adequado para garantir resistência à corrosão de telhas pré-fabricadas expostas a duas classes distintas de agressividade (moderada, em Curitiba/PR, e forte, em Paranaguá/PR). Para isso, a técnica AHP será aplicada duas vezes, priorizando os critérios mais relevantes conforme cada classe de exposição. Os dados (traços e resultados de ensaios) utilizados para a construção da AHP, análises e comparações deste trabalho foram obtidos de Silva (2011) [2].

Como alternativas são apresentados cinco traços de concreto aplicáveis na execução de telhas pré-fabricadas com máquinas moldadoras (Tabela 2). Ou seja, os traços possuem a consistência adequada para produção em formas deslizantes, bem como atingem a resistência determinada em projeto. Foram ensaiados: um traço referência (REF), um com 8% de adição de metacaulim em relação à massa de cimento (MA8%), um com 8% de substituição de fíler em relação à massa de cimento (FS8%), um com adição de 1% de aditivo impermeabilizante (Penetron Admix) em relação à massa de cimento (AI1%) e um com substituição 8% de fíler e 1% de adição de aditivo impermeabilizante, ambos em relação à massa de cimento (FS8%+AI1%). Os traços foram determinados com base em estudos experimentais e de empacotamento, publicados por Silva (2011) [2].

Tabela 2: Traços de concreto: Alternativas da AHP [2]

Traço	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
Cimento CPV - ARI	1,00	1,00	0,92	1,00	0,92
Adição	-	0,08	0,08	-	0,08
Areia artificial	0,85	1,44	1,44	1,44	1,44
Areia fina	0,85	0,80	0,80	0,80	0,80
Brita 0	2,24	1,76	1,76	1,76	1,76
Água/aglomerante	0,43	0,45	0,45	0,45	0,45
Consumo de cimento (kg/m³)	440,0	417,8	395,6	430,0	395,6
Consumo de adição (kg/m³)	-	33,40	34,40	-	34,40
Aditivo superplastificante (%)	0,340	0,454	0,488	0,528	0,541
Aditivo impermeabilizante (%)	-	-	-	1,00	1,00
Abatimento de tronco de cone (mm)					80±20
Resistência à compressão (MPa)	61,0	54,0	58,2	58,0	56,5

O uso de adições minerais no concreto leva ao aumento da coesão do material no estado fresco [19], o que melhora a trabalhabilidade para produções com formas deslizantes. Nesse método executivo, o concreto precisa ser coeso, a fim de permanecer estável após o deslocamento do equipamento ao longo da pista de concretagem. Ao se utilizar materiais cimentícios suplementares também é possível diminuir o consumo de cimento e, assim, reduzir o calor de hidratação e a fissuração térmica nas primeiras idades.

Além disso, o uso de adições minerais reduz o tamanho dos poros e o volume de vazios do concreto, melhorando a permeabilidade do material no estado endurecido [19]. Como consequência, há menor entrada de agentes agressivos e acréscimo na durabilidade da estrutura. Por isso, com o intuito de obter resistência à corrosão das telhas pré-fabricadas, foram utilizadas adições minerais nos traços MA8%, FS8% e FS8%+AI1%.

O metacaulim, presente no traço MA8%, é uma pozolana artificial produzida pela queima de argila caulinita. É composto de sílica e alumina em estado amorfo que reagem com o hidróxido de cálcio (CH) produzido pela hidratação do cimento Portland, formando hidrossilicato de cálcio (C-S-H) e silicato de alumínio hidratado [20]. O traço FS8% se caracteriza pela presença do fíler calcário, que é um pó fino proveniente da rocha calcária. Além disso, ambas as adições citadas estão disponíveis na região de Curitiba, que é foco deste estudo.

Nos traços AI1% e FS8%+AI1% foi utilizado aditivo impermeabilizante, composto de, segundo o fabricante, cimento Portland, areia de sílica fina e compostos químicos que reagem com a umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação de cimento, formando uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto [21].

Para analisar qualificar os traços descritos, foram adotados critérios de tomada de decisão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Critérios da AHP para tomada de decisão

Critérios	Fonte
Custo	[2]
Absorção por imersão (%)	[32]
Coeficiente de absorção capilar ($\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$)	[33]
Penetração de água sob pressão (mm)	[34]
Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	[2]
Consumo de cimento (kg/m^3)	[2]
Penetração de íons cloreto (C)	[35]
Profundidade de carbonatação (mm)	[2]

A durabilidade do concreto estrutural depende das características do sistema de poros [22]. A distribuição e conectividade entre esses se relacionam com a capacidade de fluídos e íons se moverem através das redes interligadas [23]. Além disso, a porosidade capilar se associa à entrada de agentes agressivos no concreto através de mecanismos de transporte de massa [24].

Toda estrutura externa a uma edificação está sujeita a ciclos de molhagem e secagem e a absorção capilar influencia no transporte de água e de outros agentes agressivos para o interior do concreto [25]. A absorção capilar pode ser definida como a propriedade de transporte de fluídos em vazios não saturados [26] ou como um processo físico no qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares [27]. Por ser influenciada pelo volume total de poros capilares e não por um único poro, a porosidade do concreto pode ser evidenciada pela absorção capilar [2].

A distribuição de tamanhos e diâmetros médios dos poros são os fatores cruciais que determinam a permeabilidade à água [28]. O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio consiste no estudo da distribuição do tamanho dos poros baseada na medida do volume de mercúrio que se acumula nos poros de uma amostra seca, em função da pressão aplicada [24]. Através do método é possível determinar os poros que variam de 2 nm a 200 μm de diâmetro, bem como o volume total de poros da amostra [2]. Portanto, são critérios para escolha do melhor traço os ensaios de absorção por imersão, coeficiente de absorção capilar e penetração de água sob pressão (Tabela 3).

A corrosão é um processo de deterioração do metal que implica na perda de seção das barras de aço. Há formação de produtos expansivos, gerando tensões internas que fissuram o concreto e levam ao lascamento e destacamento da camada de revestimento. Em estágios avançados, compromete a segurança estrutural, podendo levar as estruturas a colapso [29]. Ela ocorre por dois motivos principais: devido à

redução da alcalinidade do concreto ocasionada pela carbonatação e pela presença de cloretos, que mesmo com o pH elevado despassivam a armadura pontualmente, formando pites que diminuem a sua capacidade portante [30]. Assim, torna-se necessário avaliar a profundidade de carbonatação e penetrabilidade de íons cloreto, a fim de impedir que esses agentes agressivos atinjam às armaduras (Tabela 3).

Outros dois critérios da AHP são custo e consumo de cimento (Tabela 3). Para um concreto ser aplicável, é necessário ter custo acessível à planta de produção, portanto, ao se fazer uma escolha de traço é necessário levá-lo em consideração. O consumo de cimento está diretamente relacionado ao custo. Além disso, quanto maior for o consumo de cimento, maior será o calor de hidratação, podendo levar a maior fissuração por retração e consequente porta de entrada de agentes agressivos.

Como a resistência à compressão é imprescindível às estruturas de concreto, uma vez que é parâmetro de dimensionamento prescrito por norma técnica [5], este parâmetro não será critério de decisão na AHP, uma vez que os traços que não apresentarem resistência mínima de projeto, não podem ser aplicados nas telhas pré-fabricadas. A Figura 2 apresenta o objetivo, a rede de critérios e as alternativas da AHP que será aplicada para as duas classes de agressividade.

Figura 2: Rede de critérios e opções de escolha da AHP

2.2 Definição de prioridades

Para definir as prioridades da Análise Hierárquica é necessário atribuir escalas de importância através de pesos numéricos. Neste trabalho, será adotada a escala prescrita pela ASTM E 1765 [36], conforme apresenta a Tabela 4. Com a matriz de decisão montada (Tabelas 5 e 6), atribui-se a escala prescrita pela ASTM E 1765 [36] quando o item da horizontal for de importância equivalente ou maior do que o item da vertical. Caso contrário (se o item da vertical for mais importante) atribui-se a escala sobre um. Por exemplo, visando durabilidade, ao se comparar custo *versus* absorção por imersão, a absorção é levemente mais importante do que o custo e, portanto, a escala é igual a 1/3 (Tabela, linha 2, coluna 2).

É nesta etapa que as Análises Hierárquicas para distintas as classes de agressividade se diferem. Como o objetivo desta AHP é escolher o traço de concreto que garanta a maior resistência à corrosão às telhas pré-fabricadas de concreto, o custo – para as duas localizações – é de menor importância. Os resultados de absorção por imersão, coeficiente de absorção capilar, penetração de água sob pressão, porosimetria por intrusão de mercúrio e consumo de cimento apresentam importâncias relativas iguais, pois são propriedades correlacionadas entre si. O diferencial está na importância atribuída à profundidade de carbonatação e à penetração de íons cloreto. Considerando que Curitiba/PR, classe de agressividade II, é uma região urbana, admite-se que as telhas pré-fabricadas estarão constantemente expostas ao gás carbônico e, portanto, a carbonatação tem maior importância relativa neste caso (Tabela). Já para as telhas localizadas em Paranaguá/PR, região litorânea de classe agressividade III, as peças serão constantemente expostas a íons cloreto devido à proximidade ao mar. Assim, nessa situação, a penetração de íons cloreto é o critério de escolha de maior relevância (Tabela 6).

Tabela 4: Escala de Importância [36]

Escala de importância	
Igual	1
Levemente mais importante	3
Mais importante	5
Muito mais importante	7
Extremamente mais importante	9

Tabela 5: Matriz de decisão e escala de importância da AHP para Curitiba/PR

Matriz de decisão	Custo	Absorção por imersão	Coeficiente de absorção capilar	Penetração de água sob pressão	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Consumo de cimento	Penetração de íons cloreto	Profundidade de carbonatação	Total da Linha	Importância relativa
Custo	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	3,1	4%
Absorção por imersão	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%

Tabela 5: Matriz de decisão e escala de importância da AHP para Curitiba/PR (continuação)

Matriz de decisão	Custo	Absorção por imersão	Coeficiente de absorção capilar	Penetração de água sob pressão	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Consumo de cimento	Penetração de íons cloreto	Profundidade de carbonatação	Total da Linha	Importância relativa
-------------------	-------	----------------------	---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------	--------------------	----------------------------	------------------------------	----------------	----------------------

Coeficiente de absorção capilar	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Penetração de água sob pressão	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Porosimetria por intrusão de mercúrio	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Consumo de cimento	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Penetração de íons cloreto	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Profundidade de carbonatação	7	3	3	3	3	3	3	1	26	31%
Total Geral	26	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	3,1	85,1	100%

Tabela 6: Matriz de decisão e escala de importância da AHP para Paranaguá/PR

Matriz de decisão	Custo	Absorção por imersão	Coeficiente de absorção capilar	Penetração de água sob pressão	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Consumo de cimento	Penetração de íons cloreto	Profundidade de carbonatação	Total da Linha	Importância relativa
Custo	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	3,1	4%
Absorção por imersão	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Coeficiente de absorção capilar	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Penetração de água sob pressão	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Porosimetria por intrusão de mercúrio	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Consumo de cimento	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Penetração de íons cloreto	7	3	3	3	3	3	3	1	26	31%
Profundidade de carbonatação	3	1	1	1	1	1	1	0,3	9,3	11%
Total Geral	26	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	3,1	85,1	100%

3. Resultados e discussões

Para verificar o desempenho relativo das alternativas, os resultados dos ensaios definidos como critérios da AHP (Tabela 7) foram invertidos ($1/\text{resultado do ensaio}$), pois a matriz de decisão caracteriza o traço com maior nota como sendo o melhor (Tabela 8). Na sequência, os dados foram normalizados, dividindo-os pelo maior valor de cada linha. Essa etapa, denominada normalização, permite que todos os critérios considerados estejam na mesma escala, variando de 0 a 1 (

Tabela 9).

Tabela 7: Resultados dos ensaios propostos como critérios da AHP [2]

Idade	Resultados dos ensaios	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
-	Custo	1,00	1,11	0,99	1,13	1,11
91 dias	Absorção (%)	0,54	1,93	5,38	5,42	6,30
91 dias	Coefficiente de absorção capilar ($\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$)	5,23	11,52	13,35	9,54	10,85
91 dias	Penetração de água (mm)	20,0	10,0	20,0	10,0	21,7
91 dias	Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	6,23	4,02	11,22	5,37	3,26
-	Consumo de cimento (kg/m^3)	440	418	396	430	396
91 dias	Penetração de íons cloreto (C)	1307	916	1240	1194	1313
91 dias	Profundidade de carbonatação (mm)	0,00	4,30	4,10	5,30	5,50

Tabela 8: Resultados dos ensaios propostos como critérios da AHP invertidos

Idade	Resultados dos ensaios	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
-	Custo	1,00	0,90	1,01	0,88	0,90
91 dias	Absorção (%)	1,85	0,52	0,19	0,18	0,16
91 dias	Coefficiente de absorção capilar ($\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$)	0,19	0,09	0,07	0,10	0,09
91 dias	Penetração de água (mm)	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05
91 dias	Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	0,16	0,25	0,09	0,19	0,31
-	Consumo de cimento (kg/m^3)	2,27E-03	2,39E-03	2,53E-03	2,33E-03	2,53E-03
91 dias	Penetração de íons cloreto (C)	7,65E-04	1,09E-03	8,06E-04	8,38E-04	7,62E-04
91 dias	Profundidade de carbonatação (mm)	0,00	0,23	0,24	0,19	0,18

Tabela 9: Normalização dos resultados da AHP

Idade	Resultados dos ensaios	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
-	Custo	0,99	0,89	1,00	0,88	0,89
91 dias	Absorção (%)	1,00	0,28	0,10	0,10	0,09
91 dias	Coefficiente de absorção capilar ($\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$)	1,00	0,45	0,39	0,55	0,48
91 dias	Penetração de água (mm)	0,50	1,00	0,50	1,00	0,46
91 dias	Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	0,52	0,81	0,29	0,61	1,00
-	Consumo de cimento (kg/m^3)	0,90	0,95	1,00	0,92	1,00
91 dias	Penetração de íons cloreto (C)	0,70	1,00	0,74	0,77	0,70
91 dias	Profundidade de carbonatação (mm)	0,00	0,95	1,00	0,77	0,75

O índice de desempenho é obtido multiplicando-se os valores normalizados de cada resultado de ensaio (

Tabela 9) pela importância relativa de cada quesito analisado (Tabelas 5 e 6). Então se somam os valores das colunas referentes aos traços avaliados, resultando nas Tabelas 10 e 11, para Curitiba/PR e Paranaguá/PR, respectivamente.

Tabela 10: Resultado da AHP para Curitiba/PR

Resultados dos ensaios	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
Custo	0,0365	0,0329	0,0369	0,0323	0,0329
Absorção (%)	0,1096	0,0307	0,0110	0,0109	0,0094
Coeficiente de absorção capilar (g/m ² /s ^{1/2})	0,1096	0,0498	0,0429	0,0601	0,0528
Penetração de água (mm)	0,0548	0,1096	0,0548	0,1096	0,0506
Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	0,0574	0,0889	0,0319	0,0665	0,1096
Consumo de cimento (kg/m ³)	0,0986	0,1038	0,1096	0,1009	0,1096
Penetração de íons cloreto (C)	0,0768	0,1096	0,0810	0,0841	0,0765
Profundidade de carbonatação (mm)	0,0000	0,2912	0,3054	0,2362	0,2276
Total	0,5433	0,8165	0,6735	0,7007	0,6691

Tabela 11: Resultado da AHP para Paranaguá/PR

Resultados dos ensaios	REF	MA8%	FS8%	AI1%	FS8%+AI1%
Custo	0,0365	0,0329	0,0369	0,0323	0,0329
Absorção (%)	0,1096	0,0307	0,0110	0,0109	0,0094
Coeficiente de absorção capilar (g/m ² /s ^{1/2})	0,1096	0,0498	0,0429	0,0601	0,0528
Penetração de água (mm)	0,0548	0,1096	0,0548	0,1096	0,0506
Porosimetria por intrusão de mercúrio (%)	0,0574	0,0889	0,0319	0,0665	0,1096
Consumo de cimento (kg/m ³)	0,0986	0,1038	0,1096	0,1009	0,1096
Profundidade de carbonatação (mm)	0,0000	0,1045	0,1096	0,0848	0,0817
Penetração de íons cloreto (C)	0,2140	0,3054	0,2256	0,2343	0,2130
Total	0,6805	0,8256	0,6223	0,6994	0,6597

Através dos resultados obtidos nas Análises Hierárquicas para diferentes classes de agressividade foi possível observar que não houve, para os concretos avaliados neste estudo, diferença no traço que garantiu maior resistência à corrosão. Ou seja, tanto para Curitiba/PR (classe de agressividade II), quanto para Paranaguá/PR

(classe de agressividade III) o traço com adição de 8% de metacaulim foi a melhor opção.

Entretanto, é válido observar que - apesar de a segunda melhor opção para ambos os casos ser a adição de 1% de aditivo impermeabilizante - os resultados não seguiram a mesma tendência. Para Curitiba, os traços com adição de fíler obtiveram melhor índice de desempenho do que o concreto de referência. Já em Paranaguá, o concreto de referência – sem adições minerais ou aditivo impermeabilizante – foi a terceira melhor opção.

Apesar de o concreto de referência ter apresentado resultados melhores em algumas situações, como absorção por imersão, absorção por capilaridade e profundidade de carbonatação (Tabela 7), ao se realizar uma análise global por AHP, este traço não foi considerado a melhor opção.

4. Considerações finais

Dentre os traços avaliados, a opção que garantiu maior resistência à corrosão às telhas pré-fabricadas protendidas foi o concreto com 8% de adição de metacaulim, mesmo com o aumento em 11% no custo em relação ao traço de referência. Não houve diferença nos resultados da AHP ao se alterar as classes de agressividade de moderada a forte através das importâncias relativas.

A aplicação da técnica de Análise Hierárquica se mostrou eficiente para a escolha entre traços de concreto para telhas pré-fabricadas, porém a valorização dos critérios ainda é discutível, podendo ser aprimorada conforme os traços em estudo e as classes de exposição.

5. Referências bibliográficas

- [1] MELO, C. E. E. *Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreto*. 2ª edição. São Paulo: PINI, 2007.
- [2] SILVA, P. R. *Influência de adições minerais e aditivo impermeabilizante interno no desempenho de telhas protendidas pré-fabricadas em concreto*. Dissertação (mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [3] T&A. Disponível em: <http://www.tea.com.br/>. Acesso em: 9 maio de 2014.
- [4] CASSOL. Disponível em: <http://www2.cassol.ind.br/>. Acesso em: 9 maio de 2014.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- [6] MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. *Concreto: Ciência e Tecnologia - Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto*. São Paulo, IBRACON, 2011.
- [7] MOTA, A. C. M. *Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*.

- Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2011.
- [8] COSTA, H. G. *Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão*. Niterói, 2002.
- [9] SAATY, T. L. *An Essay on How Judgement and Measurement Are Different in Science and in Decision Making*. International Journal of Analytic Hierarchy Process, v. 1, n. 1, p. 61-62, 2009.
- [10] PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F.; LEVY, S. M. *Durabilidade de concretos com agregados reciclados: um aplicação de análise hierárquica*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 125-134, jul./set. 2012.
- [11] MATTANA, A.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. C. M. *Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassa de revestimento*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 63-79, out./dez. 2012.
- [12] PERELLES, D. H.; MEDEIROS, M. H. F. GARCEZ, M. R. *Aplicação da análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras*. Revista Alconpat, v. 3, n. 4, p. 165-180, set./dez. 2013.
- [13] RAISDORFER, W. J.; MEDEIROS, M. H. F. *Análise hierárquica para determinação de argamassa de reparo para um elemento comprimido atacado por CO₂ e livre de cloretos*. Simpósio sobre Materiais e Construção Civil, Toledo, 2013.
- [14] LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método da análise hierárquica*. Dissertação (mestrado), Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [15] 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, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 173-187, abr./jun. 2011.
- [16] YU-TING, L.; WEI-CHIH, W.; HAN-HSIANG, W. *AHP- and simulation-bases budget determination procedure for public building construction projects*. Automation in Construction, v. 17, p. 623-632, 2007.
- [17] DOLAN, J. G. *Shared decision-making – transferring research into practice: The Analytic Hierarchy Process (AHP)*. Patient Education and Counseling, v. 73, p. 418–425, 2008.
- [18] OMKARPRASAD, S. V. KUMAR, S. *Analytic hierarchy process: An overview of applications*. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 1–29, 2006.
- [19] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª edição. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [20] GLEIZE, P. J.P.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G. *Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes*. Cement & Concrete Composites. Science direct, n.29, p.80-87, 2007.

- [21] PENETRON ADMIX. Disponível em: <http://penetron.com.br/site/>. Acesso em: 14 maio de 2014.
- [22] KUMARA, R. e BHATTACHARJEE, B. *Assessment of permeation quality of concrete through mercury intrusion porosimetry*. Cement and Concrete Research. Science direct, n.34, p.321-328, 2004.
- [23] HEAD, M. K.; BUENFELD, N. R. *Confocal imaging of porosity in hardened concrete*. Cement and Concrete Research. Science direct, n.36, p.896-911, 2006.
- [24] PEREIRA, A. C. *Análise da porosimetria capilar mediante ensaios de intrusão de mercúrio sobre amostras obtidas de testemunhos em obras offshore*. In Congresso Brasileiro do Concreto, 48º, Rio de Janeiro, 2006. Anais do 48º Ibracon, 2006.
- [25] BARIN, D. S. *Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico*. 2008. 171 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- [26] PENESAR, D. K.; CHIDIAC, S. E. *Capillary suction model for haracterizing salt scaling resistance of concrete containing GGBFS*. Cement & Concrete Composites. Science direct, n. 31, p. 570-576, 2009.
- [27] PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland – 14ª edição*. São Paulo: Globo, 2005.
- [28] YE, G. *Percolation of capillary pores in hardening cement pastes*. Cement and Concrete Research. Science Direct, n.35, p.167-176, 2005.
- [29] ISAIA, G. A. *A corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado em edificações da primeira metade do século XX: uma metodologia de avaliação para sua detecção*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- [30] FRANÇA, C. B. *Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*. Dissertação (mestrado). Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto: preparo, controle e recebimento*. Rio de Janeiro, 2015.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 1995.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10787: Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão*. Rio de Janeiro, 1994.

- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. Philadelphia, 2007.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 1765: standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to buildings and buildings systems*. Philadelphia, 2002.