



Comparativo entre Efeito da Carbonatação em Corpos-de-Prova de Concreto Expostos na Cidade de Pelotas/RS e o Uso de Modelos Matemáticos

FERREIRA, Carina Farias ¹
PALIGA, Charlei Marcelo ²
TORRES, Ariela da Silva ²

¹Universidade Federal de Pelotas. carinaferreira@yahoo.com.br

²Universidade Federal de Pelotas. charlei.paliga@ufpel.edu.br

³Universidade Federal de Pelotas. arielatorres@gmail.com

Resumo

A carbonatação é uma das principais causas do comprometimento do desempenho de estruturas de concreto ao longo do tempo, sendo estudada por diferentes métodos. Esta pesquisa teve como objetivo fazer uma análise comparativa entre a previsão feita por modelos matemáticos existentes na literatura com a profundidade carbonatada encontrada em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova de concreto (10x20cm) em diferentes bairros da cidade com o intuito de verificar se ocorre diferença na profundidade de penetração de CO₂ ao longo do período de exposição. Os corpos-de-prova foram expostos por um período total de 16 meses, sendo retiradas amostras a cada 4 meses para aplicação de fenolftaleína e determinação da profundidade carbonatada. Em seguida, para comparação e análise dos resultados, foram aplicados os modelos de Smolczyk, Vesikari, Morinaga, Helene e Possan. Como resultado, foram encontrados valores significativos de CO₂, e através da aplicação dos modelos de previsão, foi possível observar que o modelo de Helene, apesar das diferenças entre os valores obtidos com sua aplicação e os dados do ensaio natural, representou de forma satisfatória a penetração de CO₂ ao longo do tempo para a cidade de Pelotas/RS, muito possivelmente devido às características do concreto utilizado.

Palavras-Chave: Conservação; Estruturas de concreto; Carbonatação; Ensaio natural; Modelos de previsão.

Abstract

The carbonation being a major cause of compromising the performance of structures concrete over time, and have been studied by different methods. This research had as objective to make a comparative analysis between the prediction made by mathematical models existing in the literature with the carbonation depth found in concrete elements in the city of Pelotas / RS. For that, concrete specimens (10x20cm) were exposed in different districts of the city in order to verify if there is a difference in the depth of CO₂ penetration during the exposure period. The specimens were exposed for a total period of 16 months, and samples were taken every 4 months for the application of phenolphthalein and determination of the carbonation depth. Then, for comparison and analysis of results, the models of Smolczyk, Vesikari, Morinaga, Helene and Possan were applied. As a result, significant values were found for the CO₂ penetration, and through the application of the prediction models, it was possible to observe that the Helene model, despite the differences between the values obtained with its application and the data of the natural test, represented satisfactorily the penetration of CO₂ over time to the city of Pelotas / RS, quite possibly due to the characteristics of the concrete used.

Key-Words: Conservation; Concrete structures; Carbonation; Natural test; Prediction models.

1. Introdução

Inevitavelmente, todas as construções estarão sujeitas à passagem do tempo e a variadas formas de degradação, que provocam a deterioração nos materiais de construção e a perda da funcionalidade e segurança da edificação. Os métodos e materiais empregados fazem parte da caracterização de uma obra e representam um papel de grande relevância na resistência da estrutura. Devido a isso, conhecer o comportamento dos materiais quando em uso é de fundamental importância na construção, manutenção, intervenção e até mesmo demolição de um edifício.

Estruturas construídas em concreto armado podem sofrer danos progressivos, decorrentes da ação de agentes agressivos presentes no ambiente em que a edificação ficará exposta, e que podem comprometer a estrutura como um todo. Em geral, quando se pensava na qualidade do concreto havia uma preocupação apenas com relação a sua resistência, esquecendo-se da fundamental importância da durabilidade (SILVA,1995). Neste sentido, Cánovas (1988) afirma que as estruturas de concreto armado devem reunir não apenas condições de resistência para suportar os esforços aos quais vão estar submetidas, mas também condições de constituição para que possam suportar as ações externas de caráter físico e químico diante das quais seu comportamento adquire uma importância vital.

Os problemas de durabilidade nas estruturas de concreto podem ser causados por diversos fatores que incluem a falta de conhecimento do meio ambiente que ficarão expostas, especificações inadequadas e/ou a uma má execução. Quando bem executado, o concreto oferece uma proteção física e química à armadura, onde a perda desta proteção pode ocorrer por diversas formas, sendo uma das principais ocorrências, a carbonatação (HELENE,1993). Este fenômeno ocorre devido à penetração do CO₂ que acarreta em reações que reduzem a alcalinidade e o pH comprometendo a película passivadora.

A degradação destas estruturas e a conseqüente redução de seu desempenho é um problema cada vez mais frequente no mundo inteiro. Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que avaliem a real interação da estrutura com o ambiente em que estará exposta, visto que mesmo sendo o mesmo material, o concreto comporta-se de forma diferente em ambientes com condições de exposição distintas. Como forma de avaliar o comportamento das estruturas em diferentes locais, pode-se citar o ensaio natural, onde pode ser avaliado as reais condições de exposição. Neste sentido, para John e Sato (2006), a exposição de corpos-de-prova aos agentes atmosféricos é a forma de expor um mesmo material em lugares diferentes, podendo assim correlacionar intensidades de agentes de degradação que interferem no desempenho real da estrutura. Este método tem como principal vantagem a ausência de qualquer artifício no processo, com todos os fatores de degradação atuando simultaneamente na intensidade real. Por outro lado, fatores de uso e aqueles relacionados com a interação entre os diversos materiais e componentes da construção não são considerados.

A determinação da influência dos diversos fatores que interferem na durabilidade das estruturas é de alta complexidade, e demonstra a importância dos métodos que estimam o processo de deterioração e sua evolução ao longo do tempo. Como forma de auxiliar os estudos feitos nesta área, inúmeros modelos de previsão de vida útil que descrevem ou estimam o processo de degradação das estruturas de concreto ao longo do tempo vêm sendo desenvolvidos, possibilitando avanços consideráveis no entendimento do comportamento destas estruturas. A aplicação destes modelos pode ser feita tanto para estruturas existentes, para avaliar as condições de segurança, como também das novas construções, auxiliando na etapa de projeto, para que em conformidade com o ambiente em que serão expostas, estas tenham a vida útil esperada (POSSAN,2010).

Diante do exposto, é de fundamental importância estudos que relacionem a degradação natural de estruturas de concreto com a vida útil estimada por modelos de previsão, de forma que seja possível alcançar resultados que caracterize o real comportamento destas estruturas com o meio em que estão expostas. Assim, este estudo teve como objetivo fazer uma análise comparativa entre a previsão feita por modelos matemáticos existentes com a carbonatação em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS.

2. Materiais e Métodos

Este trabalho teve como metodologia o ensaio natural e a aplicação de modelos de previsão existentes na literatura. A primeira etapa foi realizada através da exposição de corpos-de-prova de concreto em diferentes locais da cidade de Pelotas/RS. Já a segunda consistiu na aplicação de diferentes modelos

de previsão de vida útil e na comparação dos resultados obtidos com os valores encontrados na exposição natural das amostras.

2.1 Ensaio natural

Como forma de simular um concreto real utilizado na cidade e sua interação com o ambiente, foram utilizados neste trabalho, 60 corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm) de concreto, fornecidos por uma construtora local. As amostras foram confeccionadas com relação água/cimento de 0,6, cimento CP IV - 32 da Votoran (cimento mais usual da região) e resistência à compressão (fck) de 20Mpa, valor mínimo considerado para um concreto estrutural, de acordo NBR 6118 (2014).

Com o intuito de verificar se o concreto teria comportamento diferente frente à penetração de CO₂, os corpos de prova foram expostos em diferentes locais da cidade de Pelotas/RS. Os ambientes de exposição foram pontos representativos de cada região da cidade, determinados devido à maior circulação de veículos, maior concentração de moradias e também facilidade de acesso e espaço físico disponível, devido ao grande número de corpos-de-prova que seriam colocados em cada local. Assim, foram colocados 12 corpos-de-prova em cinco locais da cidade, sendo estes: bairro centro, bairro Porto, bairro Fragata e bairro Três Vendas (devido a extensão deste último bairro, foram escolhidos dois locais para a exposição dos corpos-de-prova). A Figura 1 apresenta a localização dos diferentes pontos analisados.

Figura 1: Mapeamento da localização dos corpos-de-prova na cidade de Pelotas/RS.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

O bairro Três Vendas está localizado na zona norte da cidade. O primeiro local deste bairro encontra-se mais afastado da área central, porém onde passa todo o tráfego de escoamento das olarias da cidade (Figuras 2 e 3).

Figura 2: Localização do primeiro ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas.



Fonte: Adaptado do Google earth.

Figura 3: Primeiro local de exposição das amostras no bairro Três Vendas.



Fonte: Autora.

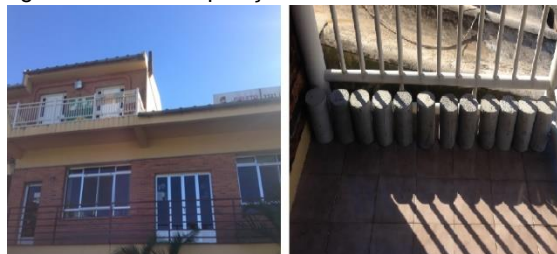
Já o segundo local deste bairro, está situado na parte mais central onde ocorre o encontro de duas das principais avenidas, possuindo intenso tráfego a sua volta (Figuras 4 e 5).

Figura 4: Localização do segundo ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Figura 5: Segundo local de exposição das amostras no bairro Três Vendas.



Fonte: Autora.

O bairro Fragata, localizado na zona oeste, é um dos mais populosos bairros da cidade e apesar de sua extensão foi escolhido somente um local para análise, devido ser de fácil acesso, sendo este o Terminal Rodoviário da cidade (Figura 6 e 7).

Figura 6: Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Fragata.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Figura 7: Local de exposição das amostras no bairro Fragata.



Fonte: Autora.

Já o local do bairro Centro (Figuras 8 e 9) localiza-se na principal rua do bairro, sendo altamente povoada e de intenso tráfego.

Figura 8: Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Centro.



Fonte: Adaptado do Google earth.

Figura 9: Local de exposição das amostras no bairro Centro.



Fonte: Autora.

Por fim, no bairro Porto, no sul da cidade, as amostras foram inseridas na beira do Canal São Gonçalo (Figuras 10 e 11).

Figura 10: Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Figura 11: Local de exposição das amostras no bairro Porto.



Fonte: Autora.

Para avaliação da carbonatação, foi retirada uma amostra com três corpos-de-prova (cps) de cada localidade a cada quatro meses, até completado 16 meses de exposição. Foi realizado então, o ensaio de resistência à compressão do concreto de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), para sua verificação, que deveria ser no mínimo 20 MPa e para abertura do cp para execução do ensaio colorimétrico. A evolução média da resistência à compressão ao longo do ensaio está apresentada na Tabela 1. Através destes valores e para posterior aplicação nos modelos, foi obtida a resistência à compressão média para cada dia de exposição, com base na NBR 6118 (2014) para o tipo de cimento utilizado nos corpos-de-prova (CP IV),

Tabela 1: Resistência à compressão média dos corpos-de-prova de concreto (Mpa).

Local	Tempo de exposição (meses)			
	4	8	12	16
Bairro Fragata	27,44	32,17	34,05	35,47
Bairro Centro	24,48	30,52	31,61	30,28
Bairro Porto	26,99	33,22	32,34	32,87
Bairro Três Vendas 1	26,99	34,33	33,39	35,37
Bairro Três Vendas 2	28,65	33,99	30,85	35,70

Fonte: Autora.

Após o rompimento dos corpos-de-prova, foi aplicada para a verificação da espessura da camada carbonatada, a solução de fenolftaleína composta por 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. Segundo Cadore (2008), esta substância química torna o concreto não carbonatado ($\text{pH} \geq 12$) vermelho carmim e permanece incolor no concreto carbonatado ($\text{pH} < 9$). A aspensão desta solução química está ilustrada na Figura 12, enquanto o aspecto das amostras após o procedimento, na Figura 13.

Figura 12: Exemplo da aspensão de fenolftaleína na face fraturada do corpo-de-prova



Fonte: Autora.

Figura 13: Exemplo do aspecto das amostras após aspensão de fenolftaleína.



Fonte: Autora.

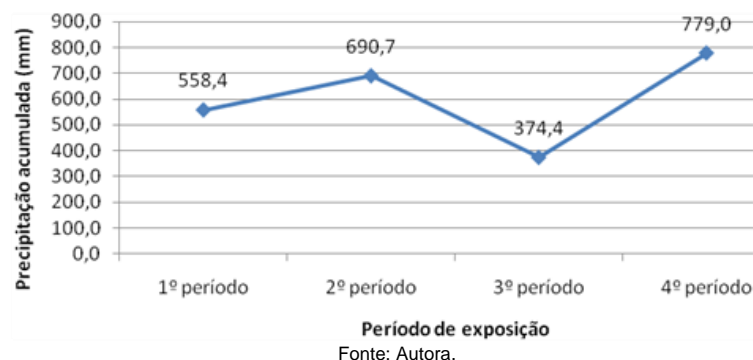
Após a aspersão da fenolftaleína esperou-se aproximadamente 5 minutos até que a solução reagisse com o concreto. Em seguida foi realizada a medição, sendo feita duas em cada corpo-de-prova, resultando em 6 valores de profundidade de cloretos por local de exposição. Para fins de previsão de profundidade de agentes agressivos a maior profundidade possui maior relevância, esta, portanto, foi a medida utilizada para a análise dos resultados.

Para a avaliação da influência das variáveis do estudo nos dados de profundidade de CO₂ obtidos nos ensaios, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA) de duas vias. Para tanto, foi utilizado o programa computacional SPSS 20,0 (Statistical Package for Social Sciences for Windows). Para todas as análises foi considerado um nível de significância (α) de 5%, ou seja, a partir deste valor os desvios são considerados não significativos apresentando um nível de confiança de 95%. Assim, pode-se rejeitar a hipótese de que as médias são todas iguais a 5% caso o valor de "p" encontrado seja menor que este valor. Para a análise estatística foram consideradas como variáveis independentes o local de exposição das amostras (bairro Fragata, Centro, Porto, Três Vendas 1 e Três Vendas 2) e o tempo em que estas ficaram expostas (4, 8, 12 e 16 meses). Já como variável dependente considerou-se a profundidade de carbonatação.

Para verificar a agressividade do ambiente de exposição das amostras, foram coletadas também, informações para caracterização da atmosfera local, sendo destacados como fatores de maior influência a umidade relativa do ar, temperatura e quantitativo de precipitação. É importante realçar que o monitoramento realizado foi do macro clima do ambiente de exposição das amostras, neste caso a cidade de Pelotas/RS. Tais dados foram obtidos através do sítio eletrônico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no Capão do Leão, que disponibiliza boletins diários e mensais de variáveis meteorológicas.

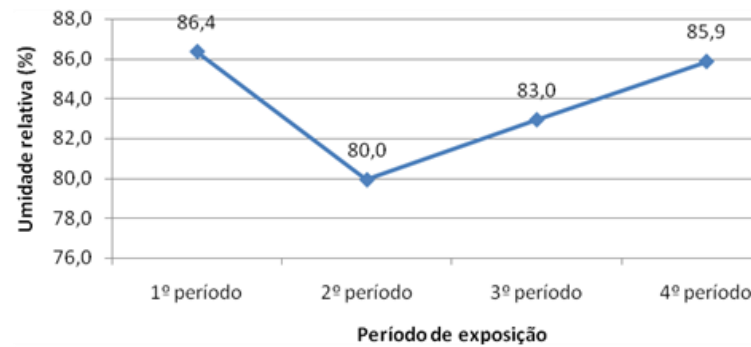
As Figuras 14, 15 e 16 mostram a precipitação acumulada, a média da umidade relativa e da temperatura máxima e mínima nos meses para os 4 períodos estudados (4 meses, referente aos meses de maio a setembro; de 4 a 8 meses, sendo de setembro a janeiro; de 8 a 12 meses, sendo de janeiro a maio; e de 12 a 16 meses, onde foi analisado de maio a setembro). Já para a aplicação do modelo de vida útil, foram utilizados dados da umidade relativa e temperatura máxima e mínima diária, sendo para esta última calculada a média.

Figura 14: Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras



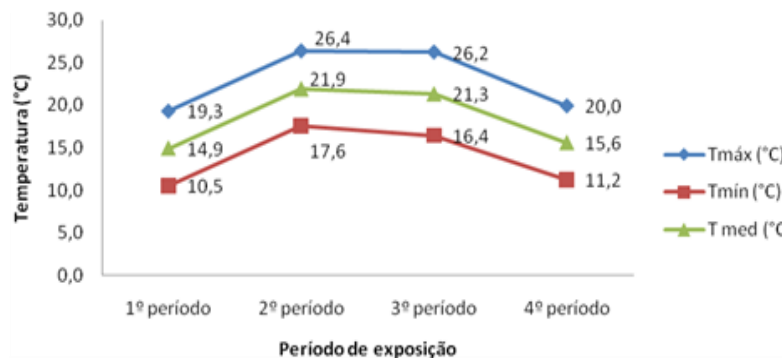
Fonte: Autora.

Figura 15: Umidade relativa média para cada período de exposição das amostras



Fonte: Autora.

Figura 16: Temperatura média em cada período de exposição das amostras



Fonte: Autora.

2.2 Modelos de previsão de vida útil

Para realização desta pesquisa, foram aplicados métodos para análise da penetração de CO₂ em estruturas de concreto que tivessem seus dados de entrada compatíveis com os dados já adquiridos no ensaio natural ou de fácil obtenção. Foi determinada a profundidade de carbonatação diária, sendo o tempo de exposição, o tempo em que os corpos-de-prova estavam expostos no dia calculado.

Nos modelos de previsão que possuíam como variáveis de entrada características do concreto como relação água/cimento e resistência à compressão, foi empregado respectivamente, o valor de 0,6 e o valor médio diário obtido através do rompimento dos corpos-de-prova no ensaio natural. Já para características ambientais, foi utilizada a umidade relativa e a temperatura média diária. A concentração de CO₂ na atmosfera foi definida através de Helene (1993) que estima valores de 0,1 a 1,2% para ambientes urbanos. Foi aplicado, então, o valor mínimo de 0,1%, o máximo de 1,2% e como forma de testar o nível de concentração mais próximo da cidade de Pelotas/RS, foram empregados dois valores intermediários (0,5% e 0,9%).

2.1.1 Modelo de Smolczyk

Smolczyk (1976) propôs um modelo levando em consideração a resistência à compressão do concreto, a velocidade de carbonatação e, indiretamente, o local em que a estrutura está exposta, sendo representado pela Equação 1.

$$ec = a \left(\frac{1}{fc} - \frac{1}{fc_{lim}} \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

Onde:

ec = espessura carbonatada (cm);

a = velocidade de carbonatação;

fc = resistência à compressão do concreto (kgf/cm²);

fc_{lim} = valor limite da resistência à compressão do concreto que pode ser carbonatada (kgf/cm²);

t = tempo de exposição (semanas).

Os parâmetros a e fc_{lim} dependem do ambiente em que a estrutura está exposta e são pré-fixados pelo autor, sendo para ambiente externo a = 250 e fc_{lim} = 625.

2.1.2 Modelo de Vesikari

O modelo proposto por Vesikari (1988), conforme as Equações 2 e 3, leva em consideração a relação água/cimento do concreto, sendo o coeficiente de carbonatação majorado se a estrutura estiver exposta em ambiente externo desprotegido.

$$ec = k\sqrt{t} \quad (2)$$

$$k = [26 (a/c - 0,3)^2 + 1,6] \quad (3)$$

Onde:

ec = profundidade de carbonatação (mm);

k = coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5}) – para ambiente externo deve ser multiplicado por 4;

a/c = relação água/cimento.

2.1.3 Modelo de Morinaga

Morinaga (1990) propôs formulações diferentes dependendo da relação água/cimento do concreto (w), sendo a Equação 4 aplicada para $w \leq 0,6$. O modelo do autor considera variáveis climáticas (umidade relativa e temperatura ambiental), a concentração de CO₂ na atmosfera, e características da estrutura como relação água/cimento e tipo de revestimento empregado.

$$x_c = \left(\frac{C}{5}\right)^{1/2} 2,44R(1,391 - 0,174HR + 0,0217T)(4,6W - 1,76)\sqrt{t} \quad (4)$$

Onde:

xc = profundidade de carbonatação (mm);

w = relação água/cimento;

C = concentração de CO₂ na atmosfera (%);

HR = umidade relativa;

T = temperatura ambiental (°C);

t = tempo de exposição (dias);

R = parâmetro para considerar o tipo de revestimento na velocidade de carbonatação.

O valor do parâmetro R foi baseado em Barbosa (2009), que define para estruturas sem revestimento o valor unitário.

2.1.4 Modelo de Helene

Helene (1997) propõe a utilização de um ábaco determinista para a obtenção do coeficiente de carbonatação em função do cobrimento de armaduras das estruturas expostas e da vida útil de projeto desejada, sendo este aplicado na Equação 5. Porém, segundo Carmona (2005), embora se obtenha o resultado com o auxílio do ábaco, o valor do coeficiente de carbonatação pode ser deduzido para cada tipo de concreto em função da sua resistência à compressão e para qualquer concentração de CO₂, conforme equação 6, sendo esta utilizada neste trabalho.

$$x = k\sqrt{t} \quad (5)$$

$$k_{CO_2} = 6,7882 - 0,1131f_{ck} \quad (6)$$

2.1.5 Modelo de Possan

O modelo desenvolvido por Possan (2010) considera diversas variáveis como as relacionadas às características do concreto (resistência à compressão, tipo de cimento empregado e teor de adição se houver), condições de exposição (ambiente interno ou externo, protegido ou não da chuva), e condições ambientais (umidade relativa e teor de CO₂ da região de exposição). O modelo está representado pela Equação 7.

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{1/2} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{3/2}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{1/2}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR}(UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] k_{ce} \quad (7)$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação média do concreto (mm);

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto (MPa);

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto em função do tipo de cimento utilizado;

t = idade do concreto (anos);

ad = teor de adição pozolânica no concreto em relação à massa de cimento (%);

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto em função do tipo de cimento utilizado;

UR = umidade relativa média;

em função do tipo de cimento utilizado;

CO₂ = teor de CO₂ da atmosfera (%);

k_{CO₂} = fator variável referente ao teor de CO₂ ambiente em função do tipo de cimento utilizado;

k_{UR} = fator variável referente à umidade relativa;

kce = fator variável referente à exposição à chuva em função das condições de exposição da estrutura.

Algumas variáveis de entrada (k_c , k_{fc} , k_{ad} , k_{CO_2} , k_{UR} e k_{ce}) foram pré-determinadas pela autora, sendo os valores empregados neste trabalho apresentados na Tabela 2, sendo determinados com base no cimento utilizado (CPIV) e no ambiente de exposição (externo e desprotegido da chuva). Como os corpos-de-prova expostos não possuíam adições, as variáveis relacionadas a esta característica foram consideradas nulas.

Tabela 2: Parâmetros empregados no modelo de Possan (2010)

Variáveis de entrada	Valor empregado
k_c	33,27
k_{fc}	1,70
k_{CO_2}	15,50
k_{UR}	1000
k_{ce}	0,65

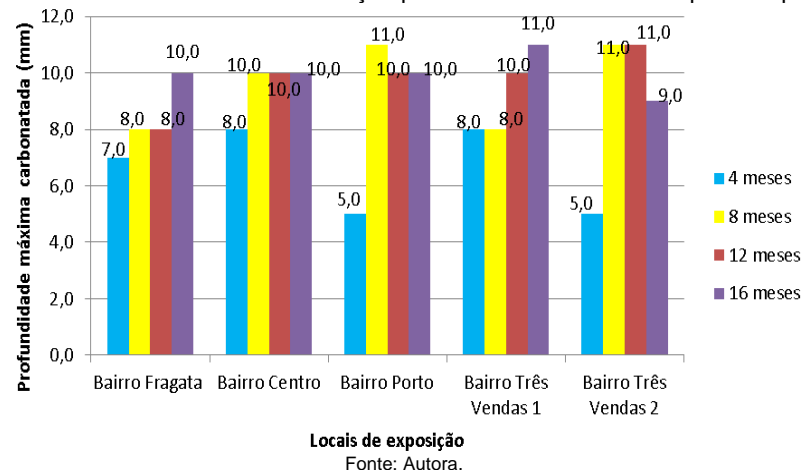
Fonte: Autora.

3. Resultados e Discussões

3.1 Profundidade de carbonatação pelo método do ensaio natural

As máximas profundidades de penetração de CO_2 para os diferentes locais de exposição e os diferentes tempos estão apresentadas na figura 17.

Figura 17: Profundidade de carbonatação para cada localidade e tempo de exposição



Fonte: Autora.

Analisando-se os dados observa-se, conforme o esperado, uma tendência de aumento entre a primeira e a última medição para todas as localidades. Nota-se que a maior profundidade de penetração de CO_2 após os 16 meses de exposição, em ambiente urbano, foi encontrada no primeiro local do bairro Três Vendas, sendo de 11mm. Já o menor valor de profundidade encontrado foi de 9 mm para este mesmo bairro, porém para o segundo local. Considerando o menor e o maior valor encontrados para degradação por CO_2 na cidade do estudo, percebe-se uma variação de aproximadamente 18%.

É importante ressaltar que a elevada umidade relativa associada às temperaturas mais baixas pode facilitar a absorção de água pelo concreto, preenchendo parcialmente os poros no interior do elemento, fazendo com que a frente de carbonatação avance até uma condição mais favorável (POLITO, 2006), o que pode ter ocasionado na maior variação de profundidade em todos os locais no primeiro período. Em contrapartida, um período com precipitação elevada em conjunto com maior umidade relativa pode levar a saturação dos poros, acarretando na dificuldade de difusão do CO_2 no interior do concreto e no impedimento da frente de carbonatação avançar (HELENE, 1997), explicando a baixa variação na profundidade no último período. Já nos períodos intermediários, a alta temperatura associada a baixos e altos volumes de chuva e umidade relativa, podem ter acarretado em diferentes variações nos locais estudados, devido à presença ou não de água nos poros do concreto. É importante levar em

consideração também que períodos onde ocorrem temperaturas mais baixas colaboram para concentrações críticas de poluentes no ar (SZCZEPANIAK, 2014).

Através da ANOVA de duas vias foi possível identificar que a variável tempo exerceu influência na profundidade carbonatada, enquanto que a variável local e a interação entre estas variáveis não influenciou. Analisando isoladamente como forma de verificar quais variáveis diferem entre si, relativamente à profundidade de carbonatação, percebe-se que não houve diferença significativa para os pares 4 e 8 meses e 12 e 16 meses ($p > 0,05$). Para os demais tempos, a análise mostrou diferença significativa entre as médias da profundidade carbonatada. Já a análise da variável independente “local”, indicou diferença significativa para o local bairro Centro em relação ao local Três Vendas 2, sendo importante ressaltar que os resultados possuem um nível de confiança de 95%.

3.2 Aplicação dos modelos de previsão

A aplicação do modelo de previsão de vida útil para penetração de CO₂ foi realizada apenas para os locais que apresentaram diferença significativa na análise estatística dos dados, sendo para o segundo local do bairro Três Vendas e o bairro Centro. As Figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam a comparação entre os resultados encontrados com a aplicação do modelo e do ensaio natural.

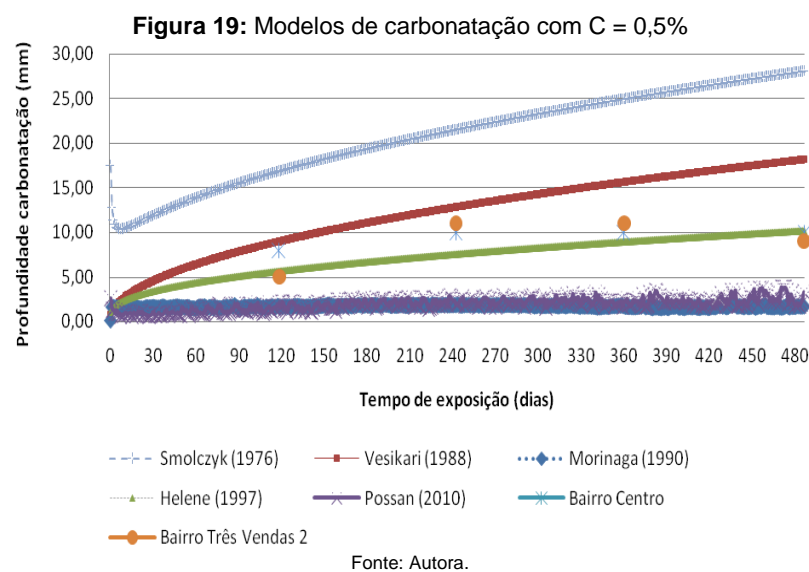
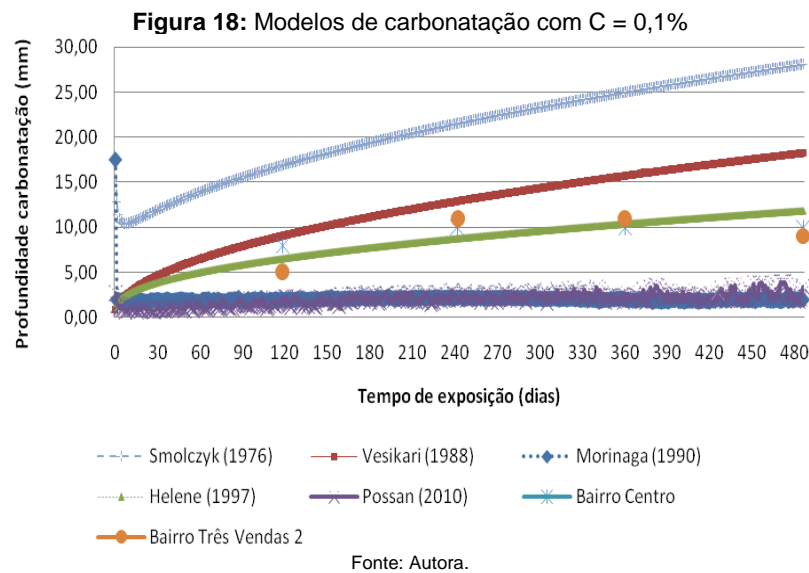


Figura 20: Modelos de carbonatação com C = 0,9%

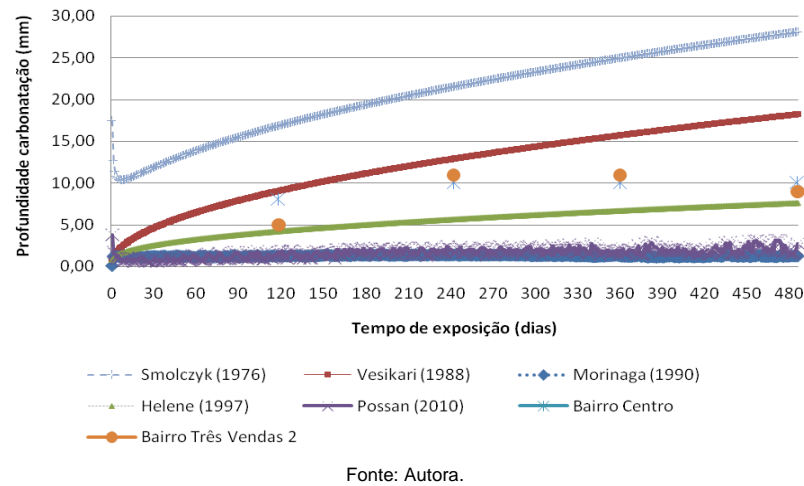
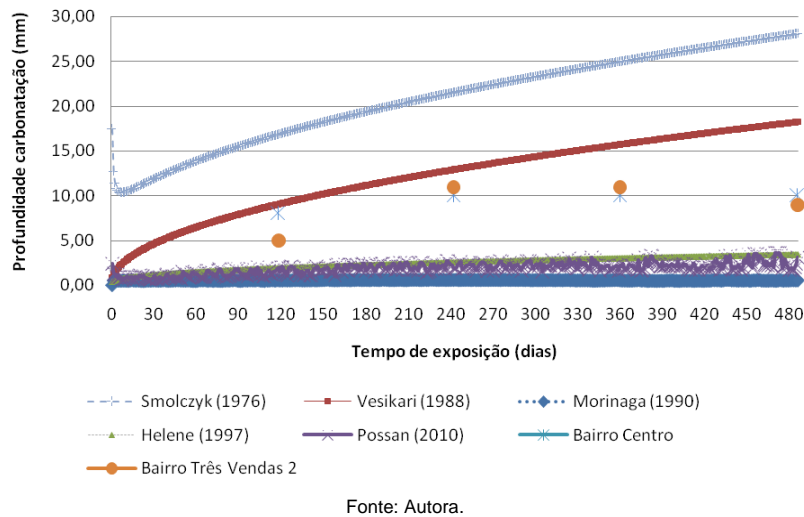


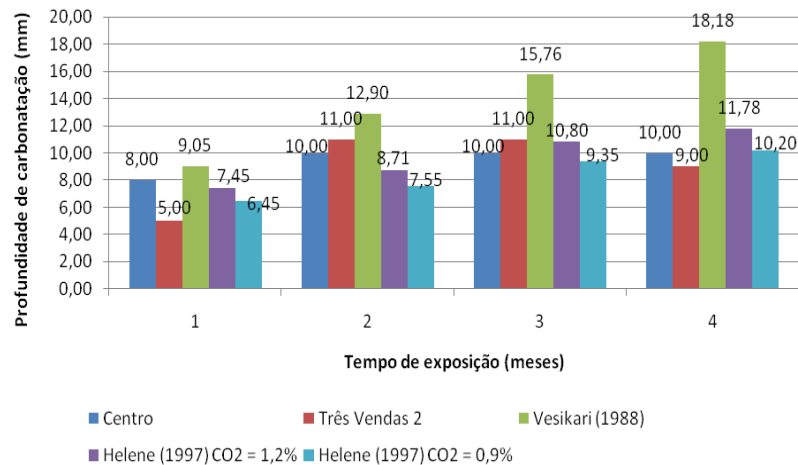
Figura 21: Modelos de carbonatação com C = 1,2%



Os valores encontrados no ensaio natural encontram-se melhores representados pelo modelo de Helene (1997), para concentração de CO₂ de 1,2%, estando próximos também dos valores obtidos para CO₂ de 0,9%. Como forma de comparar os resultados do ensaio natural com outro modelo além do proposto por Helene [13], será analisado também o modelo de Vesikari (1988) que não leva em consideração esta variável, tendo o mesmo comportamento independente da concentração de CO₂ analisada.

Fazendo-se uma avaliação de forma geral, para a cidade de Pelotas, foram aplicados os modelos de Vesikari (1988) e Helene (1997) para cada período de exposição dos corpos-de-prova. Para tanto foram utilizadas relação a/c de 0,6, concentração de CO₂ de 1,2% e 0,9% no ambiente, e resistência a compressão média de todos os locais para cada período de exposição. Os resultados estão apresentados na Figura 22.

Figura 22: Comparação dos resultados do ensaio natural com o modelo de Vesikari e Helene



Fonte: Autora.

Analisando os resultados, percebe-se que para o modelo de Vesikari (1988) em todos os períodos analisados, os valores encontrados ultrapassaram os do ensaio natural. Isto pode ser devido ao modelo em questão não avaliar as reais condições em que as estruturas estarão expostas, sendo utilizado um coeficiente de majoração e sendo o tempo a variável de maior influência. Já o modelo de Helene (1997) apresentou melhores resultados se comparado com o ensaio natural em todos os períodos para a concentração de CO₂ de 1,2%. O resultado mais próximo encontrado foi para este modelo aos 4 meses em relação ao bairro Centro, seguido do valor obtido aos 12 meses para este mesmo local. Para este bairro a maior diferença encontrada foi aos 16 meses, sendo de 1,78mm. Já para o bairro Três Vendas 2, a maior diferença foi neste mesmo período, sendo esta de 2,78mm. Para a concentração de CO₂ de 0,9%, o modelo obteve melhor resultado para o primeiro período para o bairro Três Vendas 2. No último período, para este mesmo bairro, também foi obtido o melhor resultado, sendo a diferença encontrada 1,20mm.

Quanto ao modelo de Helene (1997) ser o que melhor representou o comportamento encontrado no ensaio natural, pode-se concluir que a resistência à compressão exerceu grande influência na profundidade carbonatada. Neste sentido, Possan (2010) afirma que quando a resistência é inferior a 40 MPa, a profundidade de carbonatação sofre grandes elevações, tornando-se fortemente influenciável por esta variável, devido a relação água/aglomerante em concretos com baixa resistência ser mais elevada (superior a 0,50), aumentando a quantidade e conectividade dos poros e facilitando o ingresso de CO₂ no concreto. Ainda segundo a autora, o efeito do tipo de cimento para um nível de resistência de 20MPa ocasiona em uma profundidade de carbonatação 30% maior, caso o concreto seja produzido com cimentos CP IV e CP III, comprovando que a interação da resistência a compressão com o tipo de cimento possui influência significativa na profundidade de carbonatação do concreto.

4. Conclusões

Ao observar-se os resultados do ensaio natural para carbonatação, percebe-se conforme o esperado, uma tendência de aumento entre a primeira medição feita após 4 meses de exposição e a última após 16 meses para todos os locais analisados. Estes resultados indicaram que o macro clima da cidade de Pelotas facilitou a entrada e o avanço da carbonatação no interior do concreto devido à elevada umidade relativa e temperatura em alguns períodos analisados, demonstrando a importância deste estudo em estruturas de concreto.

Percebe-se também que após os 16 meses de exposição ocorreram para todos os locais uma baixa variação na profundidade, provavelmente ocasionada pela umidade e precipitação excessiva que acarretaram na saturação dos poros. É importante salientar que a cidade do estudo possui períodos de concentrações críticas de poluentes no ar, contribuindo para o processo de carbonatação nas estruturas. Analisando o maior (11 mm para Três Vendas 1) e menor (9 mm para Três Vendas 2) valor de profundidade de CO₂ para um tempo de exposição de 16 meses, encontrou-se uma variação de aproximadamente 18%.

A verificação da existência de diferença no comportamento das estruturas de concreto em diferentes locais, através da análise estatística, demonstrou diferença significativa entre o bairro Centro e Três Vendas 2. Através desta análise, constatou-se que a variável tempo interferiu significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de CO₂, enquanto a mudança entre bairros e a interação entre os locais e o tempo não influenciou.

Em relação ao processo de carbonatação com a aplicação dos modelos de previsão de vida útil, foi possível observar que os melhores resultados foram encontrados com o modelo de Helene (1997) para a concentração de CO₂ no ambiente de 1,2%, com bons resultados também para a concentração de 0,9%. De forma geral, este modelo demonstrou uma boa capacidade em descrever o efeito da carbonatação no concreto ao longo do tempo para a cidade de Pelotas/RS. Já o modelo de Vesikari (1988), também analisado, não representou o comportamento obtido no ensaio natural, apresentando valores mais elevados.

Assim, percebe-se que dentre todos os modelos de previsão e os diferentes parâmetros de entrada, somente o modelo de Helene (1997) possui potencial para descrever o comportamento da penetração de CO₂ em estruturas de concreto na cidade de Pelotas. Este modelo apesar de não levar em consideração as condições climáticas do ambiente, considera a resistência característica do concreto que também exerce grande influência neste processo.

Através dos resultados, percebe-se a importância de estudos relacionados a degradação natural do concreto, visto que os corpos-de-prova analisados demonstraram uma grande profundidade carbonatada para o pouco tempo em que ficaram expostos. Conclui-se também, que é fundamental o estudo do ambiente de exposição devido às diferenças encontradas em locais da mesma cidade e a aplicação de modelos de previsão que descrevam o comportamento das estruturas de concreto no real ambiente de exposição.

5. Agradecimentos

À Construtora Schumman pela doação dos corpos-de-prova para realização desta pesquisa, ao Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas da Engenharia Civil da UFPel por todo auxílio e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa e ao IFSul Pelotas pelo auxílio no desenvolvimento do ensaio colorimétrico realizado neste trabalho.

6. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento.* Rio de Janeiro, 2014.

BARBOSA, M.C. *Estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado imediatamente após sua execução.* Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CADORE, W. *Estudo da carbonatação da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.* Dissertação de M.Sc, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CÁNOVAS, M.F. *Patologia e terapia do concreto armado.* São Paulo, Pini, 1988.

CARMONA, T.G. *Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.* Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS,
<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>. Acessado em janeiro de 2016.



HELENE, P. *Contribuição ao estudo da corrosão e armaduras de concreto armado*, Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. *Vida útil das estruturas de concreto*. In: *IV Congresso iberoamericano de patologia das construções*, Porto Alegre, 1997.

JOHN, M.V.; SATO, N.M.N. “Durabilidade de componentes da construção”. *Coletânea Habitar*,. 20 – 72, v.7, 2006, Porto Alegre.

MORINAGA, S. “Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel”. In: *5th International Conference – Durability of Building Materials and Componentes*, 5 – 16, Brighton, Reino Unido, 1990.

NEVILLE, A. *Propriedades do concreto*. São Paulo, PINI, 1997.

POLITO, G. *Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POSSAN, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, P.F.A. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. São Paulo, Pini, 1995.

SMOLCZYK, H.G. “Physical and chemical phenomena of carbonation”. In: *RILEM Colloquium on carbonation of concrete*, Athènes, 1976.

SZCZEPANIAK, R.F. *Biomonitoramento e avaliação da atividade antioxidante e níveis de acetilcolinesterase no sistema nervoso central de animais expostos à poluição atmosférica da cidade de Pelotas – RS*. 2014. 83f. Dissertação de M.Sc. Programa de Pós Graduação em Bioquímica e Bioprospeção, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

VESIKARI, E. “Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement”. In: Report n 553, Technical research centre of finland, Finland, 1988.