

## Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS

C. F. Ferreira<sup>1\*</sup> , C. M. Paliga<sup>1</sup> , A. S. Torres<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [carinafferreira@yahoo.com.br](mailto:carinafferreira@yahoo.com.br)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

Recepção: 18/09/2017 | Aceitação: 26/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a compatibilidade de um modelo de previsão de vida útil existente com a penetração de cloretos em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova em diferentes locais da cidade por um período de 16 meses, sendo aplicada a solução de nitrato de prata para determinação da profundidade de cloretos. Foi utilizado o modelo de Bob (1996), para comparação e análise dos resultados. Foram encontrados valores significativos de cloreto nos elementos e um potencial do modelo aplicado em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo, apesar das diferenças encontradas.

**Palavras-chave:** conservação; estruturas de concreto; cloretos; ensaio natural; modelos de previsão.

**Citar como:** C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres. (2018), “Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 123 - 137, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Evaluation of the penetration of chlorides in concrete elements in the city of Pelotas / RS

### ABSTRACT

This research aims to verify the compatibility of an existing predictive model of life with the penetration of chlorides in exposed concrete elements in the city of Pelotas / RS. To this end, the samples were exposed at different locations in the city for a period of 16 months and silver nitrate solution was applied to determine the depth of the chlorides. The Bob model (1996) was used for comparison and analysis of the results. Significant values of chloride were found in the elements and a great potential of the model applied when describing the behavior of the depth of chlorides over time, despite the differences found.

**Keywords:** conservation; concrete structures; chlorides; natural test; prediction models.

## Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS

### RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo verificar la compatibilidad de un modelo de expectativa de vida útil existente con la penetración de cloruros en elementos de concreto expuestos en la ciudad de Pelotas / RS. Para hacer esto, los cuerpos de prueba fueron expuestos en diferentes partes de la ciudad por un período de 16 meses, aplicando la solución de nitrato de plata para determinar la profundidad de los cloruros. El modelo de Bob (1996) fue utilizado para la comparación y el análisis de los resultados. Se encontraron valores significativos de cloruro en los elementos y potencialidad de aplicación del modelo en describir el comportamiento de la profundidad de los cloruros a lo largo del tiempo, a pesar de las diferencias encontradas.

**Palabras clave:** conservación; estructuras de hormigón; cloruros; ensayo natural; modelos de previsión.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material de ampla utilização aplicado mundialmente nas construções, devido a vantagens como boa resistência à compressão, baixo custo e facilidade de produção. Esta última característica em conjunto com o desempenho está diretamente ligada à vida útil da edificação, que pode ser definida como o período no qual a estrutura é capaz de garantir não apenas sua estabilidade, mas todas as funções para as quais foi projetada (Bertolini, 2010). A degradação das estruturas de concreto e a consequente redução de seu desempenho é um problema frequente no mundo inteiro. Os problemas de durabilidade nestas estruturas podem ser causados por diversos fatores que incluem a falta de conhecimento do meio ambiente que ficarão expostas, especificações inadequadas e/ou má execução.

O ambiente em que as estruturas estarão expostas exerce influência direta no comportamento do material utilizado. Neste sentido, a década de 90 mostrou que o concreto como material de construção é instável ao longo do tempo, tendo suas propriedades físicas e químicas alteradas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente (Souza e Ripper, 2009).

A forma de deterioração que tem se mostrado de maior incidência e com maiores prejuízos econômicos em diversos países é a corrosão de armaduras (Carmona, 2005). Este mecanismo de deterioração é consequência da interação do material com o meio, aliada ou não a esforços

mecânicos (Gentil, 2003). Um dos principais agentes agressivos que podem gerar este processo de deterioração são os íons cloreto (Helene, 1997). A corrosão ocasionada devido à penetração destes íons no interior do concreto é de natureza eletroquímica, envolvendo uma reação anódica onde ocorre a oxidação do metal, e outra de natureza catódica, que ocorrem simultaneamente. Para que ocorra a corrosão das armaduras de aço, faz-se necessário a presença de quatro elementos: o condutor, que é a própria barra de aço, o eletrólito (água) para conduzir os íons, o oxigênio que forma os produtos de corrosão e uma diferença de potencial para formação de duas áreas distintas (a de natureza anódica e catódica). Este último fator pode ser ocasionado por diferentes intensidades de adensamento do concreto, diferenças de aerações, de umidade ou de concentrações salinas (Silva, 2006).

A frequência que está ocorrendo a corrosão de armaduras e os problemas associados a esta evidenciam a necessidade de buscar soluções que contribuam para minimizar este processo de deterioração e sua evolução nas estruturas de concreto armado (Vieira, 2003). Modelos de previsão de vida útil desenvolvem um importante papel tanto no auxílio de estruturas já existentes, avaliando a deterioração destas, quanto em novas construções, colaborando na etapa de projeto, para que em conformidade com o ambiente em que serão expostas, estas tenham a vida útil esperada. É de fundamental importância também, que a aplicação dos modelos de previsão de vida útil esteja associada com a degradação natural da estrutura, onde ocorre a real interação desta com o meio em que está exposta.

A partir do mencionado acima, este estudo teve como objetivo verificar a compatibilização de um modelo de previsão de vida útil, existente na literatura, com a penetração de cloretos em elementos de concreto, expostos em ambiente urbano na cidade de Pelotas/RS.

## 2. PROCEDIMENTO

A metodologia deste trabalho dividiu-se em duas etapas. A primeira refere-se ao ensaio natural, através da exposição de corpos-de-prova de concreto em diferentes locais da cidade de Pelotas/RS. Já a segunda etapa baseia-se na aplicação de um modelo de previsão de vida útil e, posterior, comparação dos resultados com os valores encontrados na exposição natural das amostras.

### 2.1 Ensaio natural

#### 2.1.1 Exposição dos corpos - de - prova

Para a realização deste trabalho foram utilizados 60 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 cm) de concreto, fornecidos por uma construtora local como forma de simular um concreto real utilizado na cidade e sua interação com o ambiente. 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 ( $f_{ck}$ ) de 20MPa (valor mínimo considerado para um concreto estrutural, de acordo NBR 6118).

A cidade de Pelotas/RS encontra-se afastada aproximadamente 60km de região marítima, e está localizada às margens do canal São Gonçalo que liga as Lagoas dos Patos e Mirim. Assim, as amostras foram expostas em ambiente urbano com umidade relativa anual superior a 70% e desprotegidas da ação do ambiente (temperatura e água da chuva), podendo ser classificada como C3 segundo a NTF 4015 (Norma Técnica Fondonorma, 2012). Pontos estratégicos da cidade foram determinados, devido à maior circulação de veículos e maior concentração de moradias. A escolha dos locais, que representam cada região, foi influenciada pela facilidade de acesso, além de disponibilidade de espaço físico devido ao grande número de corpos-de-prova que seriam colocados em cada local. Assim, os corpos-de-prova foram divididos em cinco diferentes locais da cidade, sendo estes: bairro centro, bairro Porto, bairro Fragata e bairro Três Vendas (devido a sua extensão, para este último bairro foram escolhidos dois locais para a exposição dos corpos-de-

prova). Assim, foram colocados 12 corpos-de-prova em cada localidade. A Figura 1 apresenta a localização dos diferentes pontos analisados.

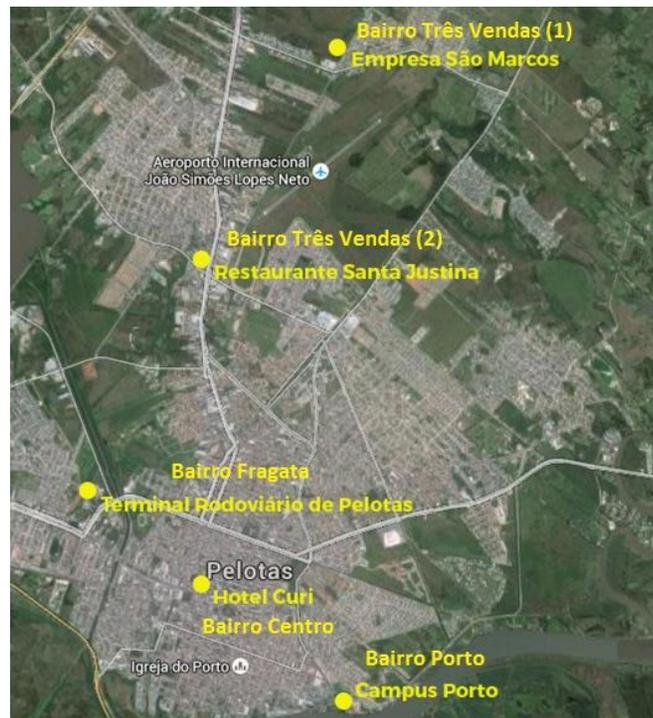


Figura 1. Mapeamento da localização dos corpos-de-prova na cidade de Pelotas/RS. (Adaptado do Google earth).

O bairro Três Vendas está localizado na zona norte da cidade. O primeiro local, apresentado nas Figuras 2 e 3 encontra-se mais afastado da área central, porém onde passa todo o tráfego de escoamento das olarias da cidade. Já o segundo local deste bairro (Figuras 4 e 5) está situado na parte mais central onde ocorre o encontro de duas das principais avenidas, possuindo intenso tráfego a sua volta.



Figura 2. Localização do primeiro ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas (Adaptado do Google earth).



Figura 3. Primeiro local de exposição do bairro Três Vendas



Figura 4. Localização do segundo ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas (Adaptado do Google earth).

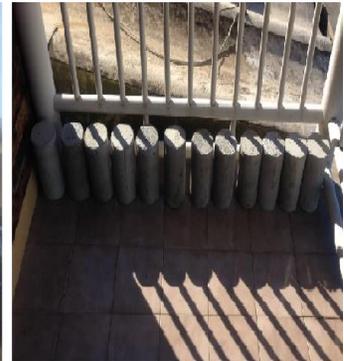


Figura 5. Segundo local de exposição do bairro Três Vendas

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, ilustrado nas Figuras 6 e 7.



Figura 6. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Fragata (Adaptado do Google earth).



Figura 7. Local de exposição do bairro Fragata

O local do bairro Centro localiza-se na principal rua do bairro, sendo altamente povoada e de intenso tráfego, conforme mostram as Figuras 8 e 9.



Figura 8. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Centro (Adaptado do Google earth).



Figura 9. Local de exposição do bairro Centro

Ao contrário dos outros locais, no bairro Porto localizado no sul da cidade, os corpos-de-prova foram expostos na beira do Canal São Gonçalo (Figuras 10 e 11).



Figura 10. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto (Adaptado do Google earth).



Figura 11. Local de exposição do bairro Porto

### 2.1.2 Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão das amostras de cada localidade foi utilizada prensa hidráulica da marca *Forney*, sendo este executado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Esse ensaio foi feito com três cps de cada localidade a cada 4 meses, sendo realizado para verificação da resistência, 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, onde percebe-se que todos os corpos-de-prova atingiram a resistência mínima, sendo, então, submetidos ao ensaio colorimétrico. Não foi realizado para este ensaio medidas de dispersão, devido ao fato desta característica não ser foco da análise.

Tabela 1. Resistência à compressão média dos corpos-de-prova de concreto

Local	Tempo de exposição			
	4 meses	8 meses	12 meses	16 meses
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	35,7

Com o valor da resistência à compressão de cada local fez-se a média por período, e baseado na NBR 6118 (ABNT, 2014) foi traçada a curva de evolução desta característica ao longo do tempo para o tipo de cimento utilizado nos corpos-de-prova (CP IV).

### 2.1.3 Medição da profundidade de cloretos

Após o rompimento dos corpos-de-prova, foi aplicado nitrato de prata em toda a face recém-fraturada. Quando esta solução é aspergida na superfície do concreto acontece uma reação fotoquímica, onde na presença de cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata e na região sem cloretos ou com cloretos combinados, há formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (Real et al., 2015). O aspecto das amostras após o procedimento, a frente de penetração de cloretos e a medição da profundidade estão representadas na Figura 12e 13.

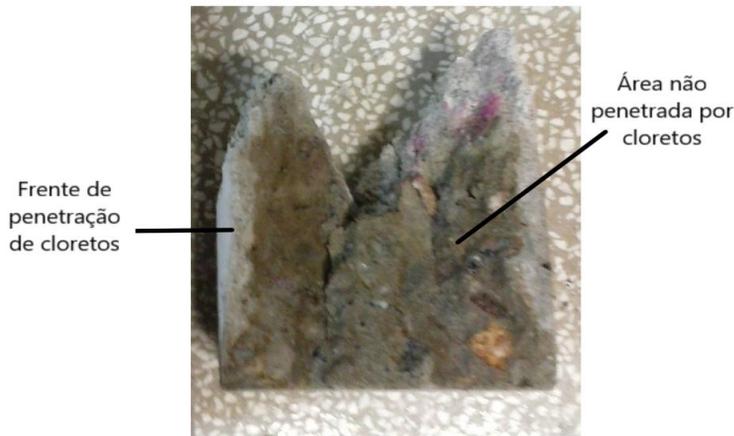


Figura 12. Exemplo da frente de penetração de cloretos na amostra fraturada



Figura 13. Exemplo da medição da profundidade penetrada por cloretos na amostra fraturada

Após a aspersão do nitrato de prata 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, está, portanto, foi a medida utilizada para a análise dos resultados.

#### 2.1.4 Análise estatística

Para a avaliação da influência das variáveis do estudo nos dados de profundidade de cloreto 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 utilizado um nível de significância ( $\alpha$ ) 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 penetração de cloretos.

#### 2.1.5 Caracterização climática da cidade de Pelotas/RS

Foram coletadas informações para caracterização da atmosfera local com o intuito de verificar a agressividade do ambiente de exposição das amostras, sendo destacados como fatores de maior influência a umidade relativa do ar, temperatura e quantitativo de precipitação. É importante destacar 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, referente 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. Não foram coletadas informações referentes à orientação dos ventos durante a época estudada, devido à dificuldade de análise desta variável em relação aos diferentes locais de exposição.

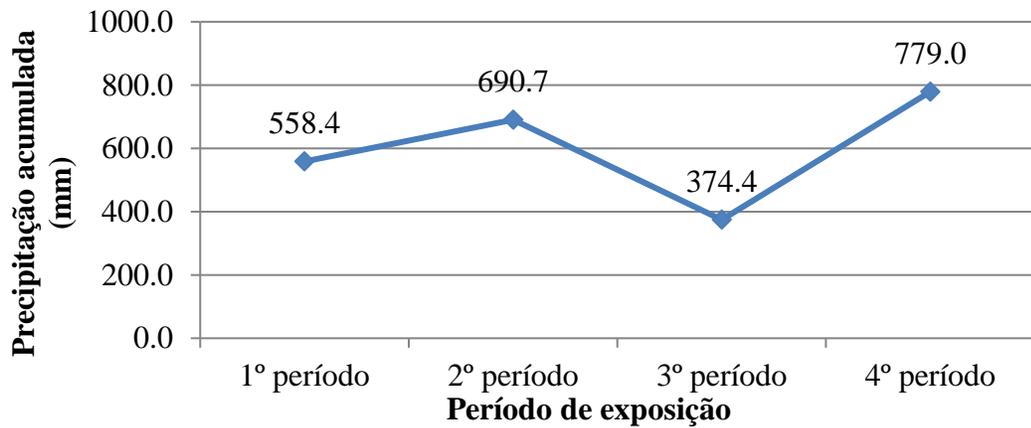


Figura 14. Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras

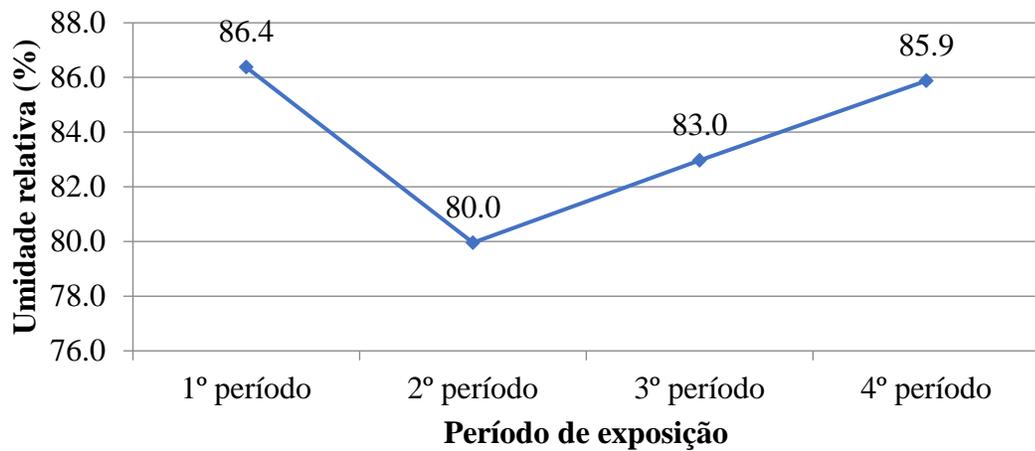


Figura 15. Umidade relativa média para cada período de exposição das amostras

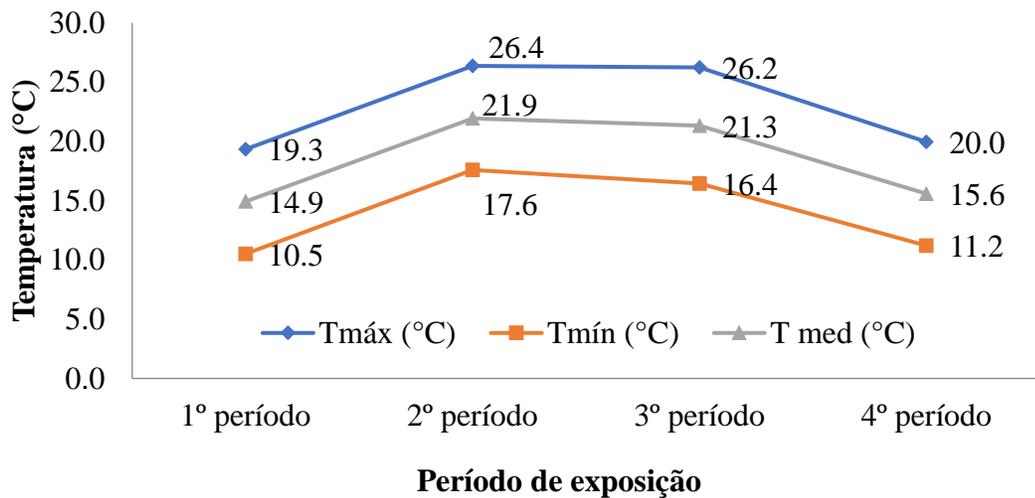


Figura 16. Temperatura média em cada período de exposição das amostras

## 2.2 Modelo de previsão de vida útil

Para análise de cloretos em estruturas de concreto, foi escolhido o modelo de Bob (1996), pois a estimativa feita por este método é realizada em termos de profundidade percorrida pelo

contaminante, ao invés de fazer a análise em termos de concentração, como grande parte dos modelos para análise de cloretos. Bob (1996) apresentou inicialmente, um modelo empregado para análise da profundidade de carbonatação nas estruturas, e após verificações baseadas em dados experimentais de longa duração, observou que a equação (1) poderia ser utilizada para modelagem do processo de penetração de cloretos (Andrade, 2001). Este modelo considera propriedades do concreto, como resistência à compressão, e características ambientais, como temperatura e umidade relativa.

$$x_m = 150 \left( \frac{ck_1k_2d}{f_c} \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

Onde:

$x_m$  = profundidade média de penetração de cloretos (mm);

$f_c$  = resistência à compressão do concreto (N/mm<sup>2</sup>);

$c$  = capacidade de fixação dos cloretos em função do tipo de cimento;

$k_1$  = coeficiente de influência da temperatura;

$k_2$  = coeficiente de influência da umidade relativa;

$t$  = tempo (anos);

$d$  = relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos na estrutura.

Para a aplicação deste modelo foram utilizadas a temperatura média e umidade relativa diária da cidade de Pelotas/RS durante o período de exposição das amostras, bem como a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) média diária do concreto obtida através da curva de evolução desta característica. Já os parâmetros  $c$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  estão apresentados na Tabela 2. O modelo foi aplicado para diferentes valores do parâmetro  $d$ , como forma de analisar diferentes concentrações críticas e superficiais de cloretos na estrutura, já que esta variável representa a relação entre as duas concentrações.

Tabela 2. Parâmetros relacionados ao modelo de Bob, 1996 (Andrade, 2011)

Parâmetro $k_1$		Parâmetro $c$		Parâmetro $k_2$		Parâmetro $d$	
$k_1$	T(°C)	$c$	(%) adições no cimento	$k_2$	UR (%)	D	r
0,67	0 a 5	1	0	0,75	50	2	0 a 19
0,75	5 a 15	0,9	15	1	85	1	20
1	15 a 25	0,75	30	0,75	100	0,5	50
1,25	25 a 35	0,67	50	-	-	0,33	65
1,5	35 a 45	-	-	-	-	0,16	85

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Profundidade de cloretos pelo método do ensaio natural

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

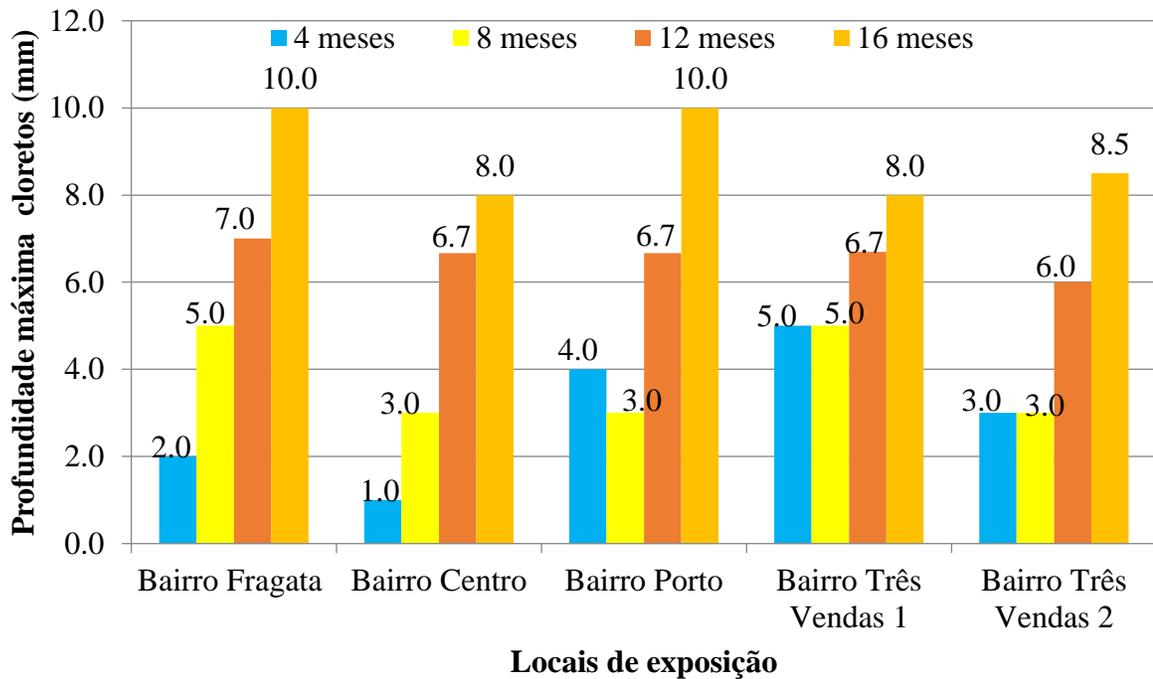


Figura 17. Profundidade de penetração de cloretos para cada localidade e tempo de exposição

Avaliando os dados, observa-se, conforme o esperado, uma tendência de aumento da frente de cloretos entre a primeira e última medição para todas as localidades. Nota-se que a maior profundidade de penetração de cloretos após os 16 meses de exposição em ambiente urbano, foram encontradas no bairro Fragata e Porto, sendo de 10mm. Esse valor foi surpreendente, pois não se acreditava que seriam encontrados cloretos livres, dentro da cidade de Pelotas, visto que é uma cidade afastada do ambiente marítimo. Ao mesmo tempo, sabe-se que a lagoa dos Patos, que circunda a cidade, possui períodos no ano que muda o estado da água doce para salgada, podendo ser uma explicação para aparecimento nos concretos, sendo importante ressaltar também que em períodos de baixa pluviosidade foram encontrados valores elevados de cloretos em alguns pontos desde a lagoa Mirim até a Lagoa dos Patos (Souza, 2015) e valores de cloreto acima do valor estabelecido pelo CONAMA para água doce em pontos do canal do prolongamento da Avenida Bento Gonçalves (Santos et al., 2012). Pode-se dizer assim, que há um indicativo de que os cloretos fazem parte da atmosfera da cidade de Pelotas/RS, onde a menor profundidade encontrada para este mesmo tempo de exposição, foi de 8mm, para o bairro Centro e para as amostras 1 do bairro Três Vendas.

Através da ANOVA de duas vias foi possível confirmar a influência do variável tempo na profundidade de cloretos, e constatou-se que a variável local e a interação entre estas variáveis não influenciaram. A partir desta análise verifica-se que toda a cidade de Pelotas/RS tem o mesmo comportamento quanto à penetração de cloretos, não interferindo a mudança entre bairros, apenas o tempo de exposição. Analisando isoladamente como forma de verificar quais variáveis diferem entre si, relativamente à profundidade de cloretos, encontrou-se que o tempo interfere significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos. Já a análise da variável independente “local”, indicou diferença significativa do primeiro local do bairro Três Vendas em relação aos locais Porto e Três Vendas 2, indicada por  $p \leq 0,05$ . Para os demais locais não foi encontrada diferença significativa, aceitando-se então, a hipótese de médias iguais entre estes e as profundidades de cloretos, sendo importante ressaltar que os resultados possuem um nível de confiança de 95%.

### 3.2 Aplicação do modelo de Bob (1996)

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

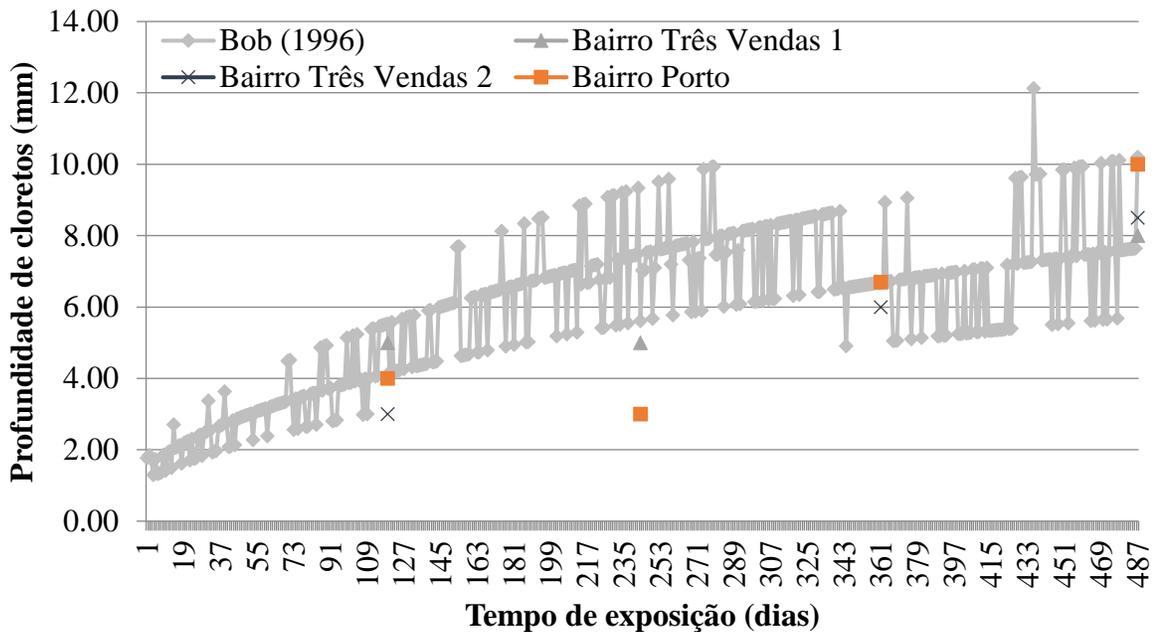


Figura 18. Modelo de Bob (1996) com parâmetro d = 2

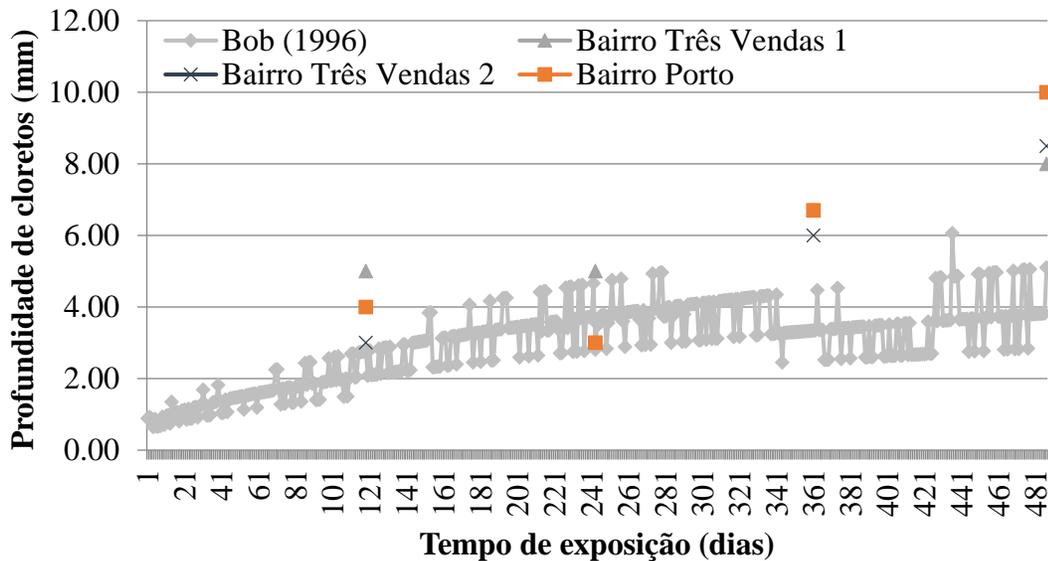


Figura 19. Modelo de Bob (1996) com parâmetro d = 1

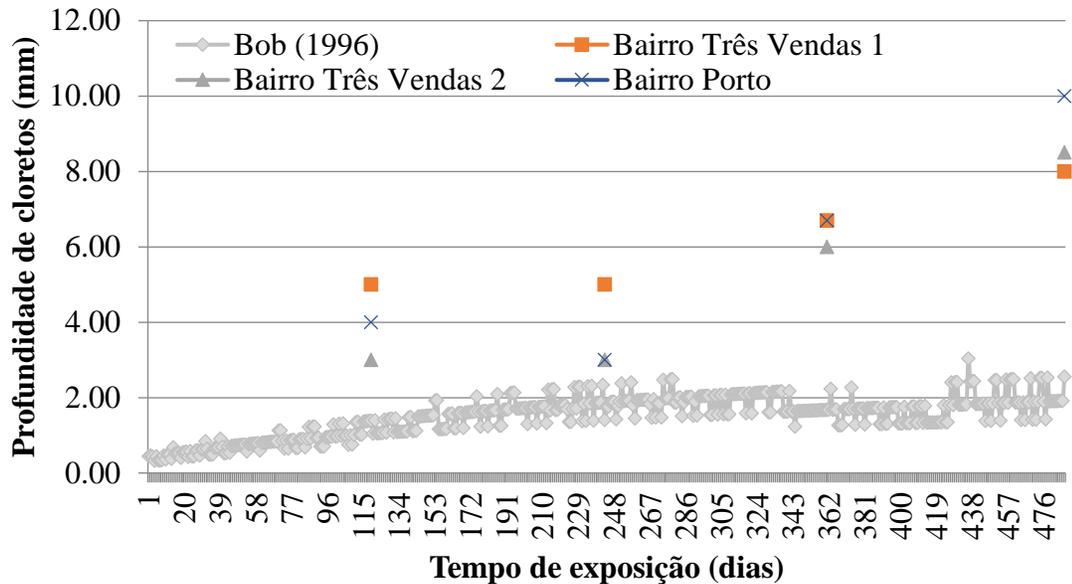


Figura 20. Modelo de Bob (1996) com parâmetro  $d = 0,5$

Observa-se que para todas as localidades o modelo que melhor se adequou aos valores encontrados no ensaio natural foi com o parâmetro  $d = 2$ , ou seja, com a relação entre concentração crítica e concentração superficial de cloretos na estrutura entre 0 e 19. Percebe-se também que para o 2º período nenhum dos locais teve seus valores descritos pelo modelo aplicado, diferentemente dos outros períodos de exposição.

Analisando isoladamente cada local para a melhor curva encontrada, e baseado nos parâmetros de entrada do modelo, pode-se dizer que para o bairro Três Vendas 1, para o primeiro período (profundidade de 5mm), encontrou-se o valor mais próximo de 4,92mm aos 71 dias de exposição, com temperatura média de 16,4°C e umidade relativa de 85%. Para o 2º período (profundidade de 5mm) foi também encontrado o valor aproximado de 4,92 mm de profundidade para 188 dias de exposição, temperatura média de 24,9°C e umidade relativa de 88%. No 3º período (profundidade 6,7mm), encontrou-se 6,69mm aos 340 dias de exposição, com temperatura média de 16,1°C e umidade relativa de 85,8% e 6,71mm aos 342 dias, temperatura média de 12°C e umidade relativa de 83,8%. Já para o 4º período (profundidade de 8mm), encontrou-se 7,65mm para 486 dias de exposição, temperatura média de 17,1°C e umidade relativa de 76%.

Para o bairro Três Vendas 2, no primeiro período onde a profundidade encontrada no ensaio natural foi de 3mm, ao aplicar o modelo encontrou-se este exato valor aos 47 dias de exposição, temperatura média de 16,95°C e umidade relativa de 95,20%. No 2º período onde a profundidade do ensaio natural foi a mesma, o valor mais próximo encontrado pelo modelo foi de 3,93mm com 120 dias de exposição, temperatura média de 15,7°C e umidade relativa de 86,50%. Para o 3º período encontrou-se o mesmo valor do ensaio natural (profundidade de 6mm), para 273 dias de exposição, temperatura média de 25°C e umidade relativa de 86,3%. Já para o último período (profundidade de 8,5mm), obteve-se com o modelo a profundidade de 8,81mm aos 363 dias de exposição com temperatura média de 16°C e umidade relativa de 82,30%.

Por fim, para o bairro Porto no 1º período, o valor de 4mm foi encontrado no ensaio natural, enquanto no modelo foi obtido 3,99mm aos 83 dias de exposição com temperatura média de 17,9°C e umidade relativa de 90,80%. No segundo período, este bairro teve o mesmo comportamento do bairro Três Vendas 1, enquanto no 3º período o valor encontrado foi o mesmo para o bairro Três Vendas 2. Já para o 4º período (profundidade de 10mm), pelo modelo encontrou-se o valor aproximado de 10,02mm para 469 dias de exposição, temperatura média de 16,9°C e umidade relativa de 83,50%.

Fazendo-se uma avaliação de forma geral, para a cidade de Pelotas/RS, o modelo de Bob (1996) foi aplicado para cada período de exposição dos corpos-de-prova. Foi utilizado como umidade relativa de 85%, devido a umidade de todos os períodos ser próxima desse valor. Já para a temperatura, como ocorre uma grande variação diária, foram utilizadas as temperaturas máximas e mínimas de cada período. Já quanto à resistência à compressão foi utilizada a média de todos os locais em cada período. O resultado está apresentado na Tabela 3 e na Figura 21.

Tabela 3 – Comparação dos resultados do ensaio natural com o modelo de Bob, 1996

Tempo de exposição (meses)	Profundidade cloretos (mm)				
	Três Vendas 1	Três Vendas 2	Porto	Bob (1996)	
				Bob Tmax	Bob Tmin
4	5	3	4	4,8	5,76
8	5	3	3	5,01	5,61
12	6,7	6	6,7	6,19	6,93
16	8	8,5	10	7,65	9,17

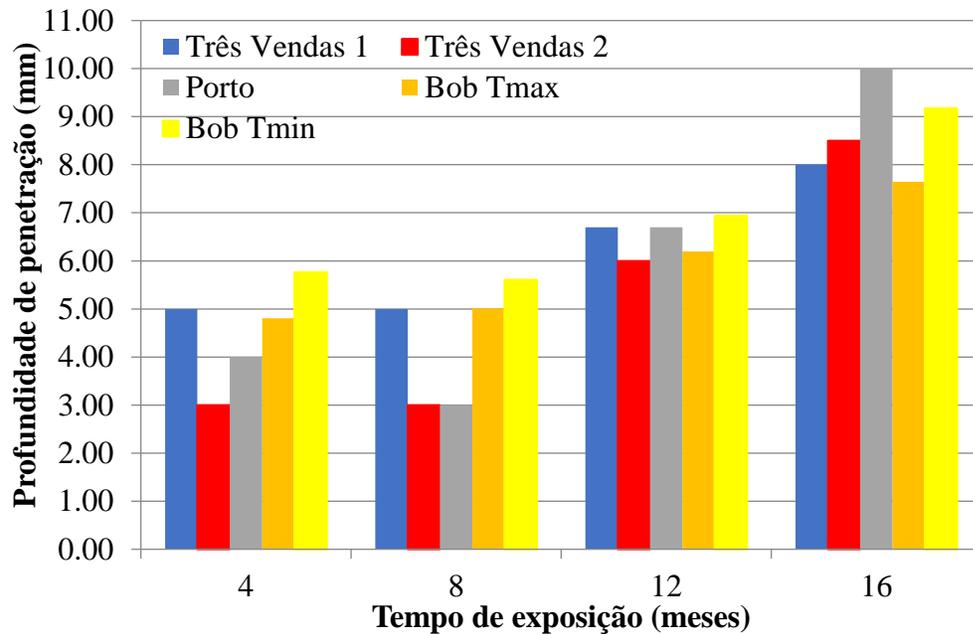


Figura 21. Comparação dos resultados do ensaio natural com o modelo de Bob (1996)

Fazendo-se uma análise dos resultados, o período que se mostrou mais próximo do modelo de Bob (1996), para ambas as temperaturas foi de 12 meses, ficando próximo dos valores encontrados para o bairro Porto e Três Vendas 1 usando a temperatura mínima, e do bairro Três Vendas 2 utilizando a temperatura máxima. Para o período de 4 meses, os valores encontrados se aproximaram somente da profundidade encontrada no bairro Três Vendas 1, sendo o mais próximo o resultado encontrado utilizando a temperatura máxima. Enquanto que para 8 meses o modelo resultou em um valor muito próximo ao bairro Três Vendas 1 também para a temperatura máxima. Após o período de 16 meses, independentemente da temperatura, foram obtidos com o modelo resultados menores do que para o ensaio natural, onde o valor encontrado com a maior temperatura aproximou-se do bairro Três Vendas 1, e a maior profundidade (9,17mm) foi encontrada com a menor temperatura. Esta diferença pode ser devido à grande variação de temperatura diária da cidade de Pelotas/RS, como

também pelo fato do modelo considerar somente certos valores de umidade relativa (50%, 85% e 100%), sendo que a umidade para todos os períodos se encontra entre os valores de 85 e 100%.

#### 4. CONCLUSÕES

Primeiramente, ao se observar os resultados encontrados no ensaio natural para penetração de cloretos, percebe-se 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.

Os valores obtidos para a penetração de cloretos demonstram que a cidade de Pelotas/RS, apesar de ser afastada do ambiente marítimo, favorece o avanço deste agente agressivo para o interior do concreto devido a elevada umidade e variações de temperatura que acarretam em ciclos de molhagem/secagem do concreto, facilitando a absorção e avanço de cloretos no interior da estrutura. Analisando o maior (10mm para os bairros Fragata e Porto) e menor (8mm para Três Vendas 1) valor de profundidade de cloretos para um tempo de exposição de 16 meses, encontrou-se uma variação de aproximadamente 20%.

Com o uso da análise estatística confirmou-se que a variável tempo interferiu significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos, e constatou-se que a mudança entre bairros e a interação entre os locais e o tempo não influenciou. Através do teste de comparações múltiplas foi encontrada diferença significativa entre o local Três Vendas 1 com os locais Porto e Três Vendas 2.

Ao aplicar-se o modelo de previsão de vida útil de Bob (1996) para analisar a penetração de cloretos, foi possível perceber que para todos os locais a opção que melhor se adequou aos valores encontrados no ensaio natural foi utilizando o parâmetro  $d = 2$ , ou seja, com a relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos na estrutura variando de 0 a 19. Analisando os locais isoladamente, e cada período de exposição, percebe-se que dependendo dos valores das variáveis de entrada (tempo, temperatura e umidade relativa) foram encontrados valores próximos de profundidade ao longo do tempo para todas as localidades. Porém, ao aplicar-se o modelo de previsão de forma geral para a cidade de Pelotas, percebe-se que os valores obtidos se aproximaram dos dados coletados no ensaio natural para os 12 meses de exposição para os bairros Três Vendas 1 e Porto, utilizando a temperatura mínima, e do bairro Três Vendas 2 para a temperatura máxima. Para os tempos de 4 e 8 meses, o modelo apresentou valores muito próximos ao bairro Três Vendas 1.

Conclui-se que o modelo de Bob (1996) apresentou diferenças entre os valores obtidos com sua aplicação e os dados do ensaio natural, provavelmente devido à grande variação de temperatura diária da cidade de Pelotas e pelo fato do modelo considerar somente certos valores de umidade relativa (50%, 85% e 100%) sendo que a umidade na cidade em questão, para todos os períodos, encontra-se entre os valores de 85 e 100%. Porém, o modelo aplicado mesmo com a diferença encontrada, apresentou boa aderência aos dados observados mostrando-se adequado para algumas situações, demonstrando potencial em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo para a cidade de Pelotas, sendo necessários alguns ajustes nos parâmetros de entrada.

Assim, com o indicativo da presença de cloretos na cidade analisada e o potencial demonstrado pelo método estudado, é importante para trabalhos futuros, a verificação do teor de cloretos no ambiente de exposição e a comprovação da profundidade de cloretos no concreto através de outras formas que complementem o ensaio colorimétrico, para que seja possível o refinamento das variáveis aplicadas no modelo e sua melhor aplicação.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Construtora Schumman pela doação dos corpos-de-prova para realização desta pesquisa e ao Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas da Engenharia Civil da UFPel por todo auxílio e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa.

## 6. REFERENCIAS

- Andrade, J. J. O. (2001), “*Contribuição a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.277.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010) “*Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção*”. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos, p.414.
- Bob, C. (1996), “*Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures*”. In: International conference: concrete repair, rehabilitation and protection. Proceedings, Dundee, pp.17-28.
- Carmona, T. G. (2005), “*Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação*”. Dissertação de Mestrado em engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.103.
- Estação Agroclimatológica de Pelotas. “*Boletim Agroclimatológico*”. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>> Acessado em: 15.jan.2016.
- Gentil, V. (2003), “*Corrosão*”, Rio de Janeiro, LTC, p.341.
- Helene, P. (1997) “*Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*”. Ambiente Construído, São Paulo, v.1, n.2, pp.47-57.
- Norma Técnica Fondonorma (2012). *NTF 4015 – Concreto. Durabilidad*. Santiago de León de Caracas.
- Real, L. V., et al. (2015), “*Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*”. Revista Alconpat, v.5, nº2, pp.149 – 159. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Santos, F. S., et al. (2012), “*Estudo das características físico - químicas da água do Canal Prolongamento da Av. Bento Gonçalves – Pelotas – RS*”. In: Congresso norte nordeste de pesquisa e inovação. Anais. Palmas.
- Silva, F. G. S. (2006), “*Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, p.236.
- Souza, M. F. (2015), “*Qualidade da água do canal São Gonçalo RS/Brasil – uma avaliação hidroquímica e considerando seus usos múltiplos*”. Dissertação de Mestrado em recursos hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p.105.
- Souza, V., Ripper, T. (2009), “*Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*”, São Paulo, Pini, p.255.
- Vieira, F. M. P. (2013), “*Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.242.