

COMPORTAMENTO DO CONCRETO FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS E CO₂ NA CIDADE DE PELOTAS/RS

Behavior of the concrete compared to the action of chlorides and CO₂ in the city of Pelotas /RS

Carina Farias Ferreira¹, Charlei Marcelo Paliga², Ariela da Silva Torres³

Recebido em 22 de fevereiro de 2019; aceito em 02 de maio de 2019; disponível on-line em 17 de setembro de 2019.



PALAVRAS CHAVE:

Conservação;
Estruturas de concreto;
Cloretos;
Carbonatação;
Ensaio natural;

KEYWORDS:

Conservation;
Concrete structures;
Chlorides;
Carbonation;
Natural test.

RESUMO: As principais causas do comprometimento da vida útil das estruturas de concreto é a ação de cloretos e CO₂. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a ação destes agentes em corpos-de-prova de concreto expostos em ambiente urbano na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foi realizado um ensaio para a estimativa da evolução do processo natural de penetração de cloretos e CO₂, em cinco diferentes locais da cidade (um local no bairro Centro, Porto e Fragata e dois locais no bairro Três Vendas) e, também, para diferentes tempos de exposição aos cloretos e CO₂ (4, 8, 12 e 16 meses). As profundidades de avanço dos cloretos e CO₂ foram determinadas por meio da aplicação de nitrato de prata e fenolftaleína, nas amostras expostas ao ambiente urbano. Conforme esperado, foi encontrada uma tendência de aumento entre a primeira e a última medição para todos os locais analisados. Os valores encontrados foram significativos tanto para a penetração de cloretos quanto CO₂, principalmente devido ao clima da cidade que se mostrou favorável a estes processos. Baseado nos resultados encontrados, este trabalho tem o intuito de colaborar nas pesquisas que utilizem mesmo método, e demonstrar a importância de considerar a ação do ambiente e sua influência direta do nas estruturas de concreto e da realização de estudos que o levem em consideração.

ABSTRACT: The main causes of compromising the useful life of concrete structures are the action of chlorides and CO₂. Thus, this paper had as objective to evaluate the action of these agents in concrete specimens exposed in an urban environment in the city of Pelotas / RS. For this, an experiment was carried out to estimate the evolution of the natural process of chloride and CO₂ penetration in five different locations in the city (one in the Centro, Porto and Fragata neighborhoods and two in the Três Vendas neighborhood) for different exposure times. to chlorides and CO₂ (4, 8, 12 and 16 months). The depths of chloride and CO₂ were determined by the application of silver nitrate and phenolphthalein in samples exposed to the urban environment. As expected, an upward trend was found between the first and last measurements for all analyzed sites. The values found were significant for both chloride and CO₂ penetration, mainly due to the favorable climate of the city. Based on the results, this work aims to collaborate in research using the same method, and demonstrate the importance of considering the action of the environment and its direct influence on concrete structures and the carrying out of studies that take it into account.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: carinafferreira@yahoo.com.br (C. F. Ferreira)

Engenheira Civil, mestrandia em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas.

² e-mail: charlei.paliga@ufpel.edu.br (C. M. Paliga)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/Departamento de Tecnologia da Construção, Universidade Federal de Pelotas.

³ e-mail: arielatorres@gmail.com (A. S. Torres)

Engenheira Civil, Doutora, Professora, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/Departamento de Tecnologia da Construção, Universidade Federal de Pelotas.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade 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). Neste sentido, segundo Silva (1995), 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.

Estruturas de concreto armado são caracterizadas por fatores, como: a versatilidade, a facilidade de execução, o baixo custo, a resistência a esforços solicitantes, a aderência e os coeficientes de dilatação térmica dos materiais que tornam possível a ação do concreto em conjunto com a armadura. Quando bem executadas, apresentam alta durabilidade, devido à proteção física e química que o concreto faz na armadura. Para Cánovas (1988), estas estruturas 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 bom comportamento adquire uma importância vital.

Para Helene (1997), os agentes de deterioração mais recorrentes nas estruturas de concreto armado e que podem causar a perda da proteção física e química, são a penetração de cloretos e a carbonatação. Estas formas de deterioração ao atingir a armadura podem promover além de séria corrosão, o aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de concreto, até perda da seção resistente e da aderência, resultando no colapso da estrutura ou de suas partes. Sendo o ambiente de exposição propício à degradação e, sabendo que a perda da seção e de aderência são imperceptíveis a olho nu, ressalta-se a necessidade de realização de ensaios específicos para sua identificação.

Devido à importância da qualidade do concreto e dos diversos fatores que interferem na durabilidade das estruturas, estudos relacionados ao tema contribuem para que não sejam construídas edificações que se tornem obsoletas em curto espaço de tempo. Estes estudos, normalmente são realizados por intermédio de ensaios de laboratório, que segundo Figueiredo (2004), não avaliam as reais condições de exposição às quais as edificações estarão submetidas, simulando o processo de degradação através de um ambiente mais agressivo, diferente do ensaio ao natural que de acordo com Possan (2004), oferece a interação real com o meio agressivo, a exposição às intempéries e a possibilidade de avaliação da degradação devido ao efeito sinérgico dos agentes agressivos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a ocorrência e evolução da penetração de cloretos e CO_2 em elementos de concreto após exposição em ambiente urbano na cidade de Pelotas/RS.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Fortes e Andrade (2001), o concreto é um material que absorve a umidade do ambiente com muita facilidade, e em contrapartida, seca muito devagar. Esta característica associada a outros fatores como: temperatura, concentração de CO_2 e a forma como as estruturas de concreto estão expostas ao meio ambiente, exercem influência no processo de carbonatação e penetração de cloretos. Assim, é importante a avaliação do efeito direto do local de implantação das estruturas de concreto na penetração e avanço de agentes agressivos no interior das mesmas.

Os ensaios ao natural ou não acelerados, de campo ou de longa duração, têm como princípio básico a exposição de amostras de concreto em ambiente de degradação natural protegido ou não de intempéries. Este ensaio se difere dos realizados em laboratório, onde não são reproduzidas as reais condições em que a

estrutura está exposta (POSSAN, 2004). 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 as 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 cidade de Pelotas/RS, ambiente de exposição deste trabalho, foi objeto de estudo de Santos et al. (2012), onde um dos parâmetros analisados foi a concentração de cloretos no canal do prolongamento da avenida Bento Gonçalves da cidade. Os autores analisaram amostras de 6 pontos do local através do método de Mohr. Tiveram como resultado, que no ano de 2012, em 5 dos pontos analisados, os níveis de cloreto ultrapassaram o valor estabelecido pela resolução do CONAMA 357/05 para água doce. Com o mesmo objetivo, Souza (2015) analisou dentre outros fatores, a concentração de cloretos em 22 locais desde a lagoa Mirim até próximo à desembocadura do canal São Gonçalo na Laguna dos Patos. A autora comparou o resultado com o descrito pela resolução do CONAMA 357/05, e concluiu que apesar dos valores não terem ultrapassado os limites da legislação, foram elevados em alguns pontos no período de baixa pluviosidade. Os resultados foram comparados também com os encontrados por Machado (2002), que encontrou valores bem abaixo dos máximos encontrados em seu trabalho, indicando uma significativa alteração do ambiente, que pode estar associada ao aumento dos efluentes que aportam o canal São Gonçalo.

Já visando o estudo da qualidade do ar na cidade em questão, Silva et al. (2016) realizaram um levantamento das emissões veiculares ocorridas no ano de 2012. Baseado na

metodologia proposta pela Agência de Proteção Ambiental Norte-americana (EPA) e de dados fornecidos pelo Departamento Nacional de Trânsito, os autores determinaram os poluentes emitidos por todas as categorias veiculares. Como parte dos resultados foi encontrado o CO como o poluente mais emitido, sendo o valor no ano do estudo de aproximadamente 11.497 toneladas, onde os automóveis (que totalizaram 59% da frota) foram responsáveis por 63% do total da emissão. Neste contexto, pode ser citado o estudo de Szczepaniak (2014), que possuía dentre seus objetivos, analisar a poluição atmosférica em diferentes pontos da cidade nas quatro estações do ano de 2012, sendo utilizado para isto filtros de celulose e o equipamento “DustTrak”. Com os resultados encontrados foi observado que os diferentes bairros estudados não seguiram um padrão, existindo diferenças significativas nos níveis de poluição dentro da cidade, possivelmente devido às características de cada região em relação ao tráfego de veículos ou outras atividades. A cidade de Pelotas/RS demonstrou potencial para episódios críticos da qualidade do ar, sobretudo no período de inverno em todos os pontos estudados.

4. METODOLOGIA

Este trabalho teve como metodologia o desenvolvimento do ensaio ao natural, para a avaliação da frente de propagação de cloretos e CO₂ em corpos de prova de concreto, através da real interação da estrutura com o meio em que está exposta.

Para realização deste trabalho, foram moldados 60 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20cm) de concreto, fornecidos por uma construtora local, como forma de simular um concreto real utilizado na cidade, para que as amostras tivessem um padrão. Os corpos-de-prova foram confeccionados com relação água/cimento de 0,6, utilizando-se cimento CP IV - 32 da Votoran, por ser o cimento mais usual da região de Pelotas - RS. A resistência à compressão f_{ck} de

20 MPa foi definida por ser o valor mínimo considerado para um concreto estrutural, de acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014).

Foram escolhidos diferentes locais para a exposição dos corpos-de-prova na cidade de Pelotas/RS, com o intuito de verificar se o concreto teria comportamento diferente frente à penetração de cloretos e CO₂. A definição dos pontos de exposição foram estrategicamente pensados com a finalidade de submeter os corpos de prova à locais com maior circulação de veículos e, também, maior concentração de moradias. A escolha dos locais que representam cada região foi influenciada também pela facilidade de acesso, além de disponibilidade de espaço físico devido ao grande número de corpos-de-prova que seriam colocados em cada local.

Desta forma, determinou-se os cinco diferentes locais da cidade: (1) bairro centro, (2) bairro Porto, (3) bairro Fragata, (4) bairro Três Vendas (devido sua extensão, foram escolhidos dois locais para exposição), sendo colocados 12 corpos-de-prova em cada localidade. A Figura 1 mostra o mapeamento dos locais 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. 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. 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. Já o local do bairro Centro localiza-se na principal rua do bairro, sendo altamente povoada e de intenso tráfego, ao contrário do local do bairro Porto, localizado no sul da cidade e na beira do Canal São Gonçalo.

A exposição dos corpos-de-prova nos diferentes locais cidade foi por um período total de 16 meses, sendo, a cada 4 meses, retirados 3 cps de cada localidade para que fossem avaliadas as penetrações de cloretos e CO₂. Após os tempos determinados as amostras foram levadas ao laboratório para a realização do ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Este ensaio foi realizado para verificação da resistência à compressão do concreto, que deveria ser no mínimo de 20 MPa, e com este procedimento realizar a abertura do corpo-de-prova para posterior execução dos ensaios colorimétricos. A evolução média da resistência à compressão, ao longo dos ensaios, está apresentada na Tabela 1, onde percebe-se que todos os corpos-de-prova atingiram a resistência mínima.

Como esperado, ocorreu um aumento da resistência à compressão entre o início do ensaio e após 16 meses de exposição. No bairro Fragata essa variação foi de +77,35%, para o bairro centro +51,13%, para o bairro Porto +64,35%, para o primeiro grupo de corpos-de-prova do bairro Três Vendas o aumento foi de 76,85% e por fim, para o segundo grupo deste mesmo bairro a variação foi de +78,50%.

TABELA 1: Resistência à compressão média dos corpos de prova de concreto.

Local	Tempo de exposição			
	4 meses	8 meses	12 meses	16 meses
	Resistência à compressão (MPa)			
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	28,85	33,99	30,85	35,70

FONTE: Autoria Própria.

Para a determinação da frente de penetração de cloretos, após o rompimento dos corpos-de-prova foi aplicada em toda a face recém fraturada do mesmo a solução de nitrato de prata. 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). A aspersão desta solução química bem como o aspecto dos corpos-de-prova após o procedimento está ilustrada nas Figuras 2 e 3 respectivamente.

Já para a determinação da frente de carbonatação, o processo foi similar ao anteriormente citado para cloretos, sendo realizada para a verificação da espessura da camada carbonatada, a aspersão da 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 ($\text{pH} < 9$). Na Figura 4 é apresentada a amostra fraturada com aspersão de fenolftaleína, enquanto a Figura 5 ilustra o aspecto dos corpos-de-prova após alguns minutos da aplicação desta solução.



FIGURA 2: Exemplo da aspersão de nitrato de prata na amostra fraturada. **FONTE:** Autoria Própria.

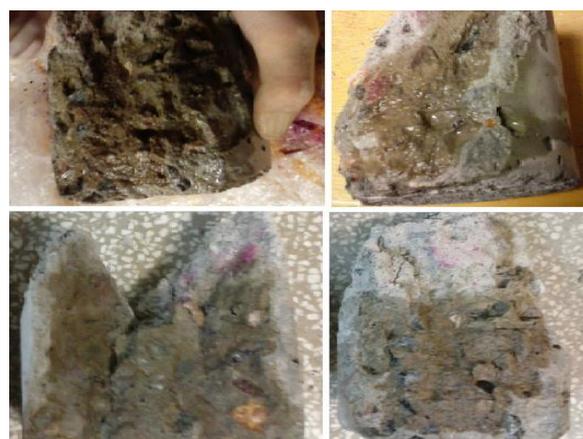


FIGURA 3: Exemplo do aspecto das amostras após aspersão de nitrato de prata. **FONTE:** Autoria Própria.



FIGURA 4: Exemplo da aspersão de fenolftaleína na amostra fraturada. **FONTE:** Autoria Própria.



FIGURA 5: Exemplo do aspecto das amostras após aspersão de fenolftaleína. **FONTE:** Autoria Própria.

Após a aspersão do nitrato de prata e da fenolftaleína esperou-se aproximadamente 5 minutos até que a solução reagisse com o concreto. Em seguida foi realizada a medição, sendo feitas duas medições em cada corpo-de-prova, resultando em 6 valores de profundidade de cloretos e CO_2 por local de exposição. Para fins de previsão de penetração de agentes agressivos a maior profundidade possui maior relevância. Esta, portanto, foi a medida utilizada para a análise dos resultados. A Figura 6 exemplifica a medição nos corpos-de-prova expostos.

Devido ao fato das amostras estarem expostas em ambiente externo desprotegido, fez-se necessário a caracterização do ambiente de exposição, neste caso a cidade de Pelotas/RS. Neste sentido, segundo Cánovas (1988), certos

fatores mesmo que não sejam capazes de romper a passividade, podem após o processo desencadeado acelerar o efeito corrosivo, aumentando a velocidade de corrosão. Foram coletadas informações diárias da temperatura máxima e mínima, umidade relativa e precipitação. Tais dados foram obtidos por meio do sítio eletrônico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no Capão do Leão, que disponibiliza boletins diários e mensais de variáveis meteorológicas. As Figuras 7, 8 apresentam a média dessas variáveis nos meses para os 4 períodos estudados (0 a 4 meses, de 4 a 8 meses, de 8 a 12 meses e de 12 a 16 meses), já a Figura 9 apresenta a precipitação acumulada de cada período.



FIGURA 6: Exemplo da medição da profundidade [a] de cloretos e [b] de carbonatação. **FONTE:** Autoria Própria.

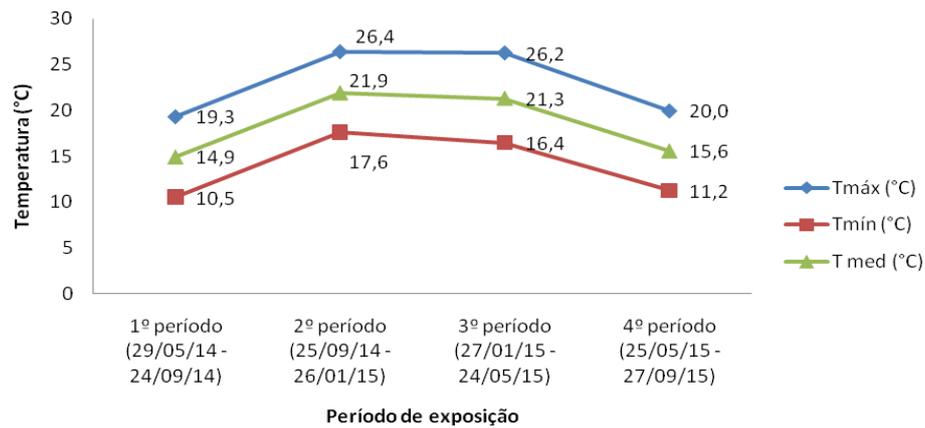


FIGURA 7: Temperatura média em cada período de exposição das amostras.

FONTE: Autoria Própria.

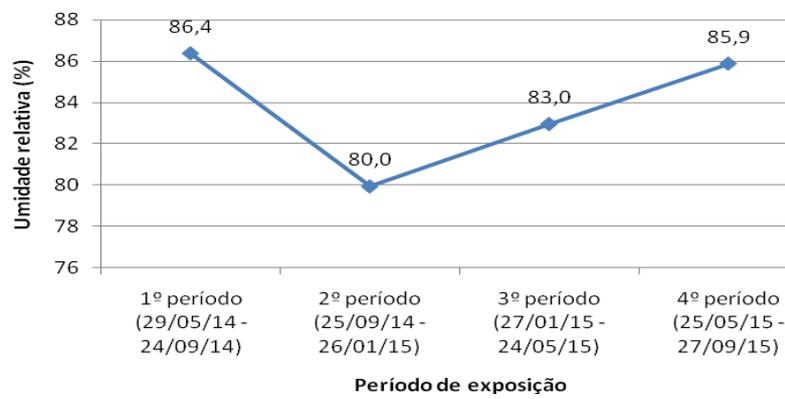


FIGURA 8: Umidade relativa média para cada período de exposição das amostras.

FONTE: Autoria Própria.

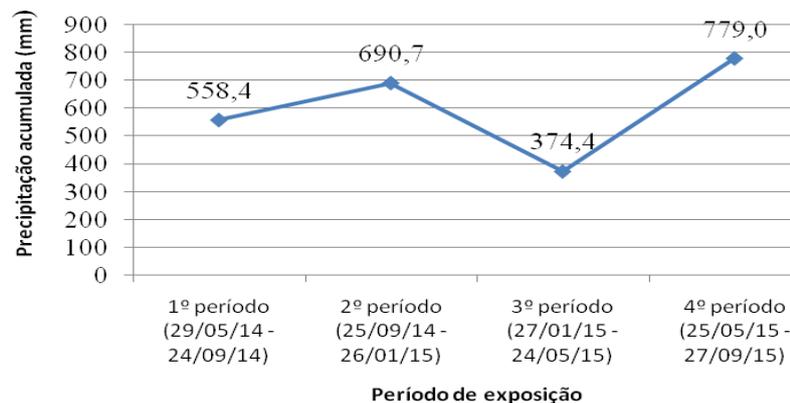


FIGURA 9: Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras.

FONTE: Autoria Própria.

Após a obtenção dos resultados da penetração de cloretos e CO_2 nos corpos-de-prova expostos em ambiente natural, os dados foram analisados estatisticamente para a avaliação da influência das variáveis do estudo nos dados de

profundidade de cloreto e carbonatação obtidos nos ensaios.

O método ANOVA, utilizado neste trabalho, pode indicar que existe diferença entre os grupos e que as médias não são todas iguais,

porém não informa quais grupos diferem. Para isto, foi realizada também uma comparação múltipla entre as variáveis. Para todas as análises foi utilizado 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 as profundidades, tanto de penetração de cloretos quanto carbonatadas, analisadas separadamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CLORETOS

As máximas profundidades de penetração de cloretos para os diferentes locais de exposição e os diferentes tempos estão apresentadas na Figura 10.

Avaliando os dados, observa-se como esperado, uma tendência de aumento da frente de cloretos entre a primeira e a 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 foi encontrada nos bairros Fragata e Porto, sendo de 10 mm. Visto que é uma cidade afastada do ambiente marítimo, não se esperava o encontro de cloretos livres dentro da cidade de Pelotas. 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, tornando-se salobra, podendo ser uma explicação para aparecimento nos concretos. É importante ressaltar também, que de acordo com Souza (2015), foram encontrados em períodos de baixa pluviosidade valores elevados de cloretos em alguns pontos desde a lagoa Mirim até a Lagoa dos Patos e valores de cloreto acima do valor estabelecido pelo CONAMA 357/05 para água doce em pontos do canal do prolongamento da Avenida Bento Gonçalves (SANTOS et al., 2012).

Já, para este mesmo tempo, a menor profundidade de cloretos foi de 8mm nas amostras 1 do bairro Três Vendas e, também, do centro da cidade. Novamente, um resultado não esperado, visto que este local do bairro Três Vendas é considerado em zona rural da cidade, portanto com maior distância da Lagoa dos Patos, entorno de 15 km. Chegando à conclusão que a presença de cloretos faz parte da atmosfera da cidade. Analisando-se o menor e o maior valor encontrados para degradação por íons cloretos na cidade do estudo, percebe-se uma variação de aproximadamente 20%.

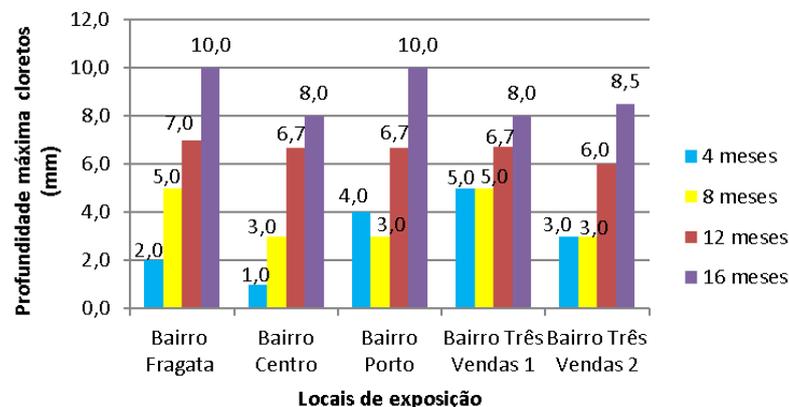


FIGURA 10: Profundidade de penetração de cloretos para cada localidade e tempo de exposição

FONTE: Autoria Própria.

É possível observar que o comportamento não segue uma relação linear entre os tempos de exposição e a penetração de cloretos. Utilizou-se então uma linha de tendência polinomial devido a esta ser a que melhor descreveu o comportamento da penetração de cloretos em cada local (Figura 11), sendo ilustradas, também, as equações propostas e os coeficientes de determinação. É importante ressaltar que a aplicação das equações geradas pelas linhas de tendência com os dados adquiridos no ensaio natural, só permitem previsão próxima dos períodos coletados. Para sua utilização, é necessário ser feito um ajuste da equação relacionando os dados coletados. O que se justifica em função de que a penetração de agentes agressivos depende de muitos fatores

(temperatura, umidade relativa, tipo de cimento, tempo de cura, relação água/cimento), que interferem na velocidade da propagação dos mesmos.

Em termos de durabilidade, é importante a comparação com os cobrimentos exigidos pela norma vigente, devido a este servir de proteção contra os agentes agressivos. Foi analisado o maior (10mm) e menor valor (8 mm) de profundidade encontrada no ensaio natural com o cobrimento mínimo para estruturas de concreto situadas em ambiente urbano, com risco de deterioração leve segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Na Tabela 2 são mostradas as porcentagens de quanto já se atingiu em relação ao cobrimento total da armadura.

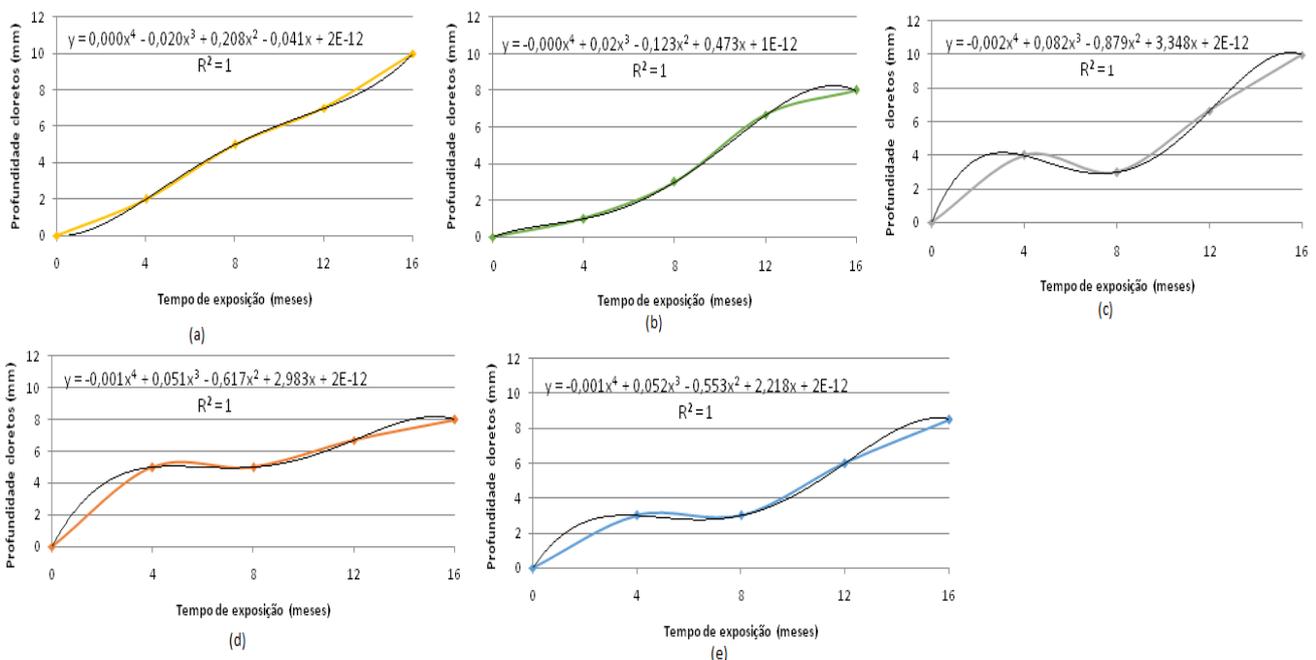


FIGURA 11: Função representativa do comportamento da penetração de cloretos para o bairro (a) Fragata, (b) Centro, (c) Porto, (d) Três Vendas 1 e (e) Três Vendas 2.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 2: Variação entre a penetração de cloretos e o cobrimento recomendado pela norma

Profundidade de cloretos medida nas amostras	Cobrimento recomendado pela norma	
	Laje (25mm)	Viga/pilar (30mm)
Profundidade de 10mm	40%	33,33%
Profundidade de 8mm	32%	26,76%

FONTE: Autoria Própria.

É importante ressaltar que os valores de cobrimentos citados são para concretos não revestidos, assim como os corpos-de-prova expostos. Entende-se pela norma, que nesta região, para concreto revestido por argamassa e pintura, pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (classe I), e por consequência os valores de cobrimentos são menores, sendo 20 mm para lajes e 25 mm para vigas e pilares. Desta maneira, pressupõe-se que os revestimentos das estruturas servem como uma barreira aos ataques de agentes agressivos aos materiais utilizados na construção, aumentando o tempo para que os mesmos causem prejuízos à durabilidade da estrutura.

Como forma de avaliar isoladamente cada localidade, a Figura 12 demonstra o percentual de variação da frente de penetração de cloretos de cada local ao longo do tempo.

Avaliando o primeiro período (0-4 meses) percebe-se que a menor variação foi no bairro centro (100%), seguido do bairro Fragata (200%), Três Vendas 2 (300%), Porto (400%) e Três Vendas 2 (500%). Vale ressaltar que foi a maior variação, em todo experimento, para os bairros Fragata, Três Vendas 1, Porto e Três Vendas 2. Este foi o período com maior umidade relativa média (86,4%) e menor temperatura máxima média atingida, de 19,3°C. Assim, para as medições realizadas neste ensaio pressupõe-se que uma maior umidade em conjunto com uma menor

temperatura auxiliou na absorção de água pelo concreto, facilitando a entrada de cloretos em seu interior, devido à facilidade que o concreto tem em absorver a umidade do ambiente. Em clima úmido, normalmente a quantidade de água é suficiente para atuar como eletrólito (FORTES e ANDRADE, 2001).

Para o segundo período (4-8 meses), a maior variação foi no bairro centro (200%), sendo um contraponto do período anterior que este bairro foi o menor. O bairro Fragata teve uma variação de 150%, o Porto, 25% e os dois pontos Três Vendas não tiveram variação em relação ao período anterior. Neste período ocorreram os maiores valores de temperaturas (médias máximas e mínimas), porém de menor umidade relativa média (80%) e o segundo período em maior acumulativo de chuva (690,70mm). O bairro centro, local de exposição, é dentre os locais o que apresenta uma área mais intensamente urbanizada e com alta obstrução devido a maior concentração de edificações, sendo a maioria prédios altos, o que ocasiona em temperaturas mais altas e umidades mais baixas que a média obtida pela estação agroclimatológica (COLLISCHON, 2016). Desta maneira, conclui-se que a maior temperatura associada a uma maior sensação térmica permitiu uma maior concentração de cloretos. Assim como um período mais chuvoso em conjunto com maior ventilação nos demais locais, pode ter contribuído para lavagem dos cloretos na camada superficial dos corpos-de-prova (BERTOLINI, 2010).

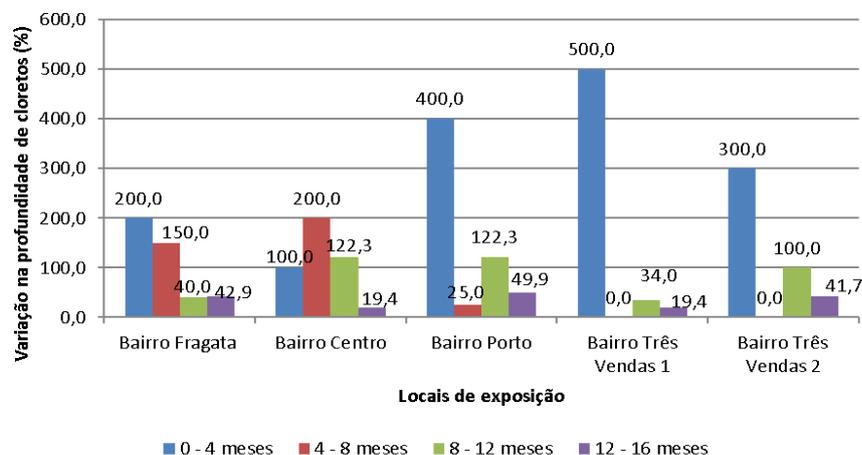


FIGURA 12: Percentual de variação da frente de penetração de cloretos para cada localidade e período de exposição.

FONTE: Autoria Própria.

A análise do terceiro período (8-12 meses) mostra que a menor variação foi no bairro Três Vendas 1 (34%), seguido do bairro Fragata (40%), Três Vendas 2 (100%) e centro e Porto (122,3%). Este foi o segundo período com maiores temperaturas e ao mesmo tempo o período com menor precipitação, tendo uma média acumulada de 374,40mm. Podendo concluir que uma diminuição na precipitação pode ter aumentado a concentração de cloreto na superfície do concreto, sendo estes absorvidos para seu interior. Assim, as altas temperaturas estimularam uma maior mobilidade das moléculas, aumentando a velocidade das reações.

Analisando o quarto período (12-16 meses), percebe-se que todos os bairros apresentaram variação inferior a 50%. Neste período ocorreu a segunda maior umidade relativa média (85,9%), muito próxima da maior umidade relativa média (86,4%). E foi o com maior acumulado de chuva (779 mm). Conclui-se assim, que o maior quantitativo de chuva, provoca uma saturação dos poros, não permitindo o maior avanço dos cloretos (FORTES, 1995). Porém, fica a dúvida se ocorre esta saturação, ou o quantitativo de cloretos presentes na atmosfera chega no limite de penetração.

Através da ANOVA de duas vias foi possível identificar que a variável tempo exerceu influência na profundidade de cloretos, enquanto que a variável local e a interação entre estas variáveis não influenciaram os resultados. A partir desta análise verifica-se que toda a cidade de Pelotas/RS, considerando este estudo de caso, apresentou o mesmo comportamento quanto à penetração de cloretos, não interferindo a mudança entre bairros, apenas o tempo de exposição.

Para verificar quais variáveis diferem entre si, relativamente à profundidade de cloretos, estas foram analisadas isoladamente. Assim, considerando somente a variável independente “tempo”, a análise demonstrou que continua a diferença significativa entre as médias das

profundidades de cloretos para todos os tempos analisados. Portanto, o tempo é uma variável que interfere significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos, o que pode ser compreendido visto que quanto maior o tempo exposto, maior a chance de o agente agressivo penetrar nos poros do concreto.

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. É importante ressaltar que os resultados possuem um nível de confiança de 95%.

5.2 CARBONATAÇÃO

As máximas profundidades de penetração de cloretos para os diferentes locais de exposição e os diferentes tempos estão apresentadas na Figura 13.

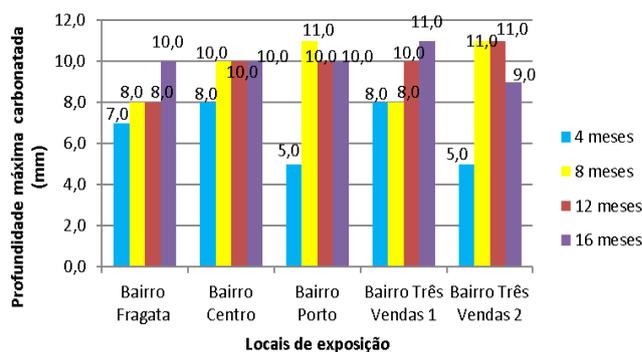


FIGURA 13: Profundidade de carbonatação para cada localidade e tempo de exposição. **FONTE:** Autoria Própria.

Analisando-se os dados observa-se, assim como para cloretos, 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 11 mm. Já o menor valor de profundidade encontrado foi de 9 mm para este mesmo bairro, porém para o segundo local.

Analisando-se o menor e o maior valor encontrados para degradação por íons cloretos na cidade do estudo, percebe-se uma variação de aproximadamente 18%.

Observa-se, também, que o comportamento não segue uma relação linear entre os tempos de exposição e a penetração de CO₂. Assim, linhas de tendência polinomiais foram utilizadas por descreverem melhor o comportamento da penetração deste agente agressivo em cada local, conforme apresentadas na Figura 14.

Percebe-se, que as amostras dos bairros Porto e Três Vendas² tiveram comportamento semelhante ao longo do período de exposição.

Observa-se, também, pouca oscilação na curva do bairro Fragata e bairro Centro, sendo neste último mais evidente devido à profundidade constante após o 2º ensaio. Porém, para todos os períodos os resultados foram muito semelhantes aos encontrados no ensaio natural.

Realizando a comparação com o cobrimento mínimo indicado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), tem-se os resultados do quanto já se atingiu em relação ao cobrimento total da armadura apresentados na tabela 3.

Assim como para cloretos, cada localidade foi estudada isoladamente, o percentual de variação da frente de carbonatação de cada local ao longo do tempo está apresentado na Figura 15.

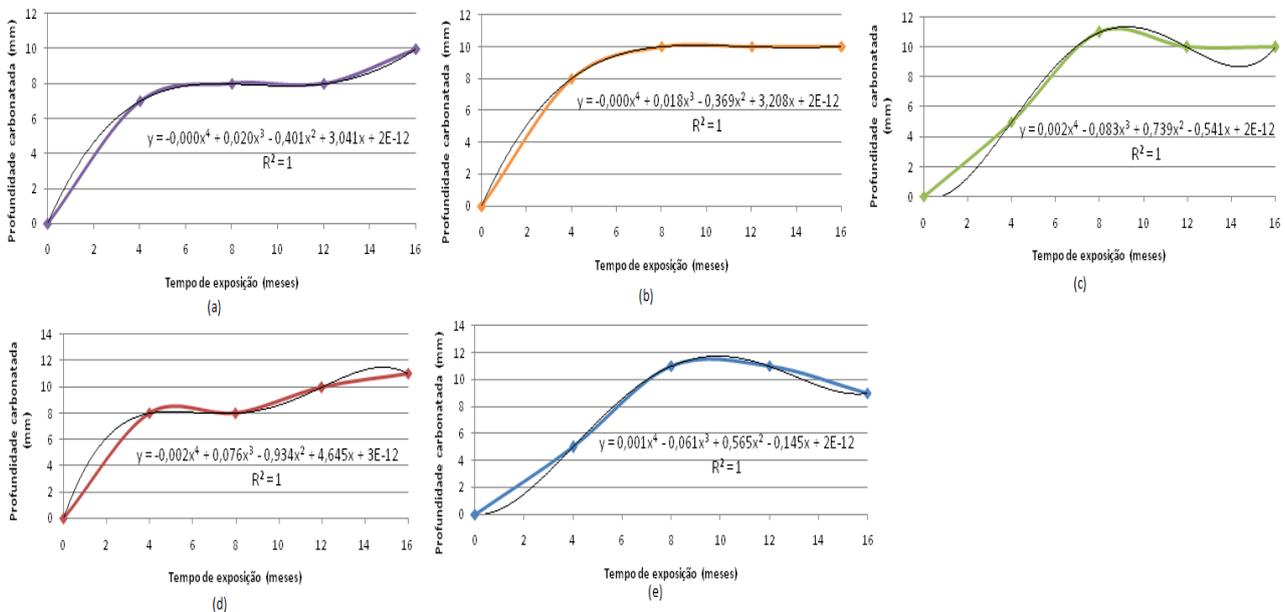


FIGURA 14: Função representativa do comportamento da penetração de CO₂ para o bairro (a) Fragata, (b) Centro, (c) Porto, (d) Três Vendas 1 e (e) Três Vendas 2.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 3: Variação entre a penetração de CO₂ e o cobrimento recomendado pela norma

Profundidade de carbonatação medida nas amostras	Cobrimento recomendado pela norma	
	Laje (25mm)	Viga/pilar (30mm)
Profundidade de 10mm	40%	33,33%
Profundidade de 8mm	32%	26,76%

FONTE: Autoria Própria.

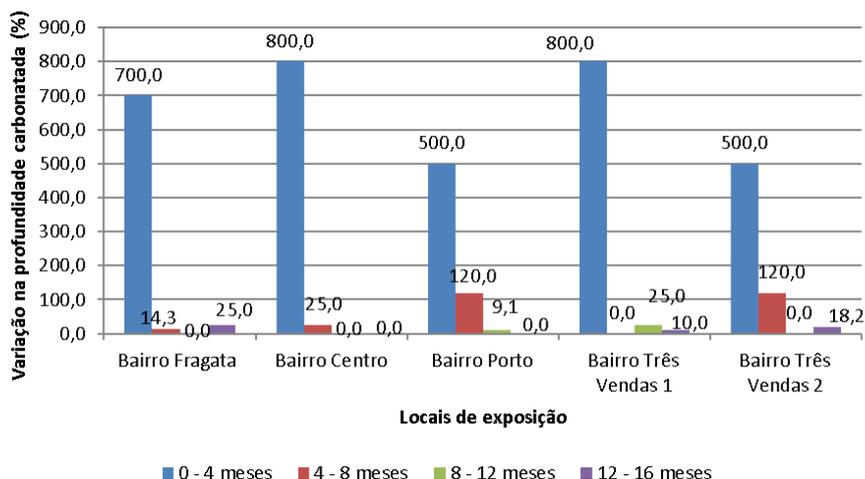


FIGURA 15: Percentual de variação da frente de carbonatação para cada localidade e período de exposição.
FONTE: Autoria Própria.

Avaliando o primeiro período (0-4 meses), percebe-se que todos os bairros apresentaram a maior variação na profundidade de penetração no primeiro período, sendo o maior nos bairros Centro e Três Vendas 1, de 800%, seguido do Fragata com 700% e 500% para os Porto e Três Vendas 2. Este foi o período com maior umidade relativa média (86,4%), e menor temperatura máxima média atingida, de 19,3°C. Podendo concluir que a elevada umidade relativa associada às temperaturas mais baixas facilitou a absorção de água pelo concreto, preenchendo parcialmente os poros no interior do elemento, fazendo com que a frente de carbonatação avançasse até uma condição mais favorável (POLITO, 2006). É importante levar em consideração que períodos onde ocorrem temperaturas mais baixas colaboram para concentrações críticas de poluentes no ar (SZCZEPANIAK, 2014).

No segundo período (4-8 meses) a maior variação foi nos bairros Porto e Três Vendas 2 (120%). Os outros bairros Fragata (150%), Centro (25%) e os dois pontos Três Vendas (0%). Foi o período com maiores valores de temperaturas (médias máximas e mínimas), porém de menor umidade relativa média (80%) e o segundo período em maior acumulativo de chuva (690,70 mm). Concluindo que a elevada temperatura estimulou

à maior mobilidade das moléculas no interior do concreto, aumentando a velocidade das reações químicas (CASCUDO e CARASEK, 2011). Ao mesmo tempo, a quantidade de chuva e a umidade relativa não deixaram com que o concreto secasse facilitando também o avanço da carbonatação (POLITO, 2006).

Analisando o terceiro período (8-12 meses), percebe-se a menor variação no bairro Três Vendas 1 (25%), seguido do bairro Porto (9,1%), os demais não tiveram variação. Neste período, ocorreram as maiores temperaturas e ao mesmo tempo o período que menos choveu, tendo uma média acumulada de 374,40mm. Pode-se concluir que a temperatura alta provocou em uma variação na carbonatação, devido a esta ser uma variável catalisadora das reações. Porém, em alguns locais esta variação não ocorreu provavelmente pela falta de água nos poros do concreto, já que neste período também ocorreu o menor valor de precipitação.

Por fim, analisando o quarto período (12-16 meses), nota-se que todos os bairros apresentaram variação inferior a 25%, sendo nulo nos bairros centro e porto. Este foi o período com segunda maior umidade relativa média (85,9%). E foi o com maior acumulativo de chuva (779 mm). Assim, conclui-se que o elevado valor de chuva em conjunto com a maior umidade relativa ocasionou

a saturação dos poros, acarretando na dificuldade de difusão do CO₂ no interior do concreto e no impedimento da frente de carbonatação avançar (NEVILLE, 1997).

A análise estatística, assim como para a profundidade de cloretos, indicou que a carbonatação teve influência da variável tempo, enquanto que a variável local e a interação entre esta e o tempo não causou efeito na profundidade. Analisando somente a variável tempo, 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 ($p < 0,05$). Para os outros resultados não foi encontrada diferença significativa com um nível de confiança de 95%.

6. CONCLUSÃO

Ao se observar os resultados encontrados no ensaio natural tanto para penetração de cloretos quanto para carbonatação, 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 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. Já os resultados da penetração de CO₂ indicaram que a cidade de Pelotas facilitou a entrada e o avanço deste agente agressivo no interior do concreto devido à elevada umidade relativa e temperatura em alguns períodos analisados. Porém percebe-se também que após

os 16 meses de exposição ocorreu 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.

Com o uso da análise estatística confirmou-se a interferência significativa da variável tempo nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos e CO₂, e através do teste de comparações múltiplas foi encontrada diferença significativa entre locais da cidade, demonstrando a importância do estudo do real ambiente em que as estruturas estão inseridas.

Baseado nos resultados encontrados, este trabalho tem o intuito de colaborar nas pesquisas que utilizem mesmo método, e demonstrar a importância de considerar a ação do ambiente e sua influência direta do nas estruturas de concreto e da realização de estudos que o levem em consideração.

7. 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.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CADORE, W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008, 150p.

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

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ações da carbonatação no concreto. In: **ISAIA, G.C. (cord.) Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1º ed. São Paulo: IBRACON, v.1, p. 849-885, 2011.

COLLISCHONN, E. Adentrando a cidade de Pelotas/RS para tomar – lhe a temperatura. **Revista do Departamento de Geografia USP**, v.especial, p.9-23, 2016.

Estação Agroclimatológica de Pelotas. “Boletim Agroclimatológico”. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>> Acessado em: 15.jan.2016.

FIGUEIREDO, C. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares**. (Doutorado em estruturas e construção civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2004, 240p.

FORTES, L.R. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995, 244p.

FORTES, L.R.; ANDRADE, J.C. **Corrosão na armadura do concreto armado: influência dos agentes cloretos e da carbonatação**. 2001. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAej-kAL/corrosao-na-armadura-concreto-armado>> Acesso em 15 mai. 2016.

HELENE, P. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo, v.1, n.2, p.47-57, 1997.

JOHN, M.V.; SATO, N.M.N. Durabilidade de componentes das construção. **Coletânea Habitare**. Porto Alegre, v.7, p. 20 – 72, 2006.

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 (Especialização em Avaliação e Perícia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006, 191p.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004, 155p.

REAL, L.V.; OLIVEIRA, D.R.B.; SOARES, T.; MEDEIROS, M.H.F. Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista Alconpat**, v.5, nº2, p.149 – 159, 2015.

SANTOS, F.S.; RANGEL, E.M.; GARCIA, J.F.C.; SANCHES FILHO, P.J. 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, 2012.

SILVA, K.L.A.; ALONSO, M.F.; OLIVEIRA, L.P. Análise das emissões atmosféricas de fontes móveis para a cidade de Pelotas – RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 38, p. 347-353, 2016.

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

SOUZA, M.F. **Qualidade da água do canal São Gonçalo Rs/Brasil – uma avaliação hidroquímica e considerando seus usos múltiplos**. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2015, 105p.

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**. Dissertação (Mestrado em ciências) – Programa de Pós Graduação em Bioquímica e Bioprospecção, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2014, 83p.