Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETOS CARBONATADOS: A INFLUÊNCIA DOS CLIMAS BRASILEIROS NOS MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

B. RIBEIRO
Mestrando em Engenharia Civil
PPGEC/NORIE UFRGS
Rio Grande do Sul; Brasil
bruno.gazzola@hotmail.com

A. ROHDEN
Professor Doutor em Engenharia Civil
PUCRS/FURB
Rio Grande do Sul; Brasil
abrahao.rohden@pucrs.br

J. O. ANDRADE
Professor Doutor em Engenharia Civil
PUCRS
Rio Grande do Sul; Brasil
jairo.andrade@pucrs.br

D. C. C. DAL MOLIN
Professora Doutora em Engenharia Civil
PPGEC/NORIE UFRGS
Rio Grande do Sul; Brasil
dmolin@ufrgs.br

RESUMO

Atualmente, diversos pesquisadores estão se dedicando ao estudo da durabilidade das edificações. Tal interesse é devido, em grande parte, aos danos ocorridos nas estruturas de concreto pelo efeito combinado da agressividade ambiental, problemas estruturais e práticas executivas inadequadas. Outro estímulo foi a criação da Norma de Desempenho, que destaca a preocupação atual em relação à durabilidade das edificações, considerando não somente aspectos relacionados à resistência mecânica. Entretanto, isso evidenciou uma lacuna existente na NBR 6118, já que não existe um modelo de previsão de vida útil para estruturas de concreto em ambientes agressivos. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo comparar dois tipos de concretos comumente utilizados no Brasil, verificando a sua capacidade de proteção à armadura quando inseridos em ambientes urbanos com altas concentrações de CO_2 por meio de ensaios não acelerados. Dessa forma, busca-se contribuir com o entendimento da influência dos diferentes climas brasileiros e dos diferentes tipos de cimento frente ao fenômeno da carbonatação. Foram utilizados dois tipos de cimento Portland: CP IV e CP V – ARI, um nível de resistência, a/c igual a 0,65, dois locais de exposição natural: Porto Alegre – RS e Belém – PA e duas condições de exposição distintas: protegido ou não protegido da chuva. No presente trabalho serão apresentados os dados de profundidade de carbonatação aos 60 e aos 120 dias em ambas as cidades.
Palavras-chave: durabilidade, modelo de previsão, carbonatação, climas brasileiros.

ABSTRACT

Nowadays, several researches are dedicating themselves to the study of the building durability. Such interest is due to the damage occurring in concrete structures by the combined effect of environmental aggression, structural problems and inadequate executive practices. Another motivation was the creation of the Brazilian Performance Standard NBR 15575, which highlights the current concern about the building durability, taking into account not only aspects related to mechanical strength. However, it showed a gap in the NBR 6118, since there is no life prediction model for concrete structures in aggressive environments. In this sense, this article aims to compare two types of concrete commonly used around the country, verifying your equipment protection capacity when inserted in urban environments with high concentrations of CO2 through non-accelerated tests. Thus, it seeks to contribute to the understanding of the influence of different Brazilian climates and different types of cement against the carbonation phenomenon. It was used two types of Portland cement: CP IV and CP V - ARI, one resistance level, w/c: 0.65, two natural exposure locations: Porto Alegre – RS and Belém – PA and two different conditions exposure: protected or unprotected from rain. In this paper we present the data of carbonation depth at 60 and 120 days in both cities.
Keywords: durability, prediction model, carbonation, Brazilian climates.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade está diretamente relacionada à interação entre as características dos materiais e/ou componentes, as condições de exposição e as condições de utilização impostas durante a vida útil da edificação. Sendo assim, não é considerada uma propriedade intrínseca dos materiais, mas uma função relacionada com o desempenho dos mesmos sob determinadas condições ambientais [1]. Diversos agentes ambientais presentes em nosso cotidiano originam processos de agressão à armadura e consequentemente ao concreto. Segundo Dal Molin [2], os principais responsáveis por danos nas estruturas devido à corrosão são os íons Cl^-, localizados próximos a regiões marítimas, e o CO_2, presente em aglomerações urbanas e industriais, ou seja: a atmosfera recorrente de muitas capitais brasileiras.

Tendo em vista que o CO_2 encontra-se sempre presente na atmosfera e em teores ainda mais elevados nas grandes cidades, o trabalho analisado se propôs a estudar o fenômeno causado por este agente agressivo, a carbonatação. Procurou-se, dessa forma, relacionar seu comportamento quando em diferentes condições de exposição e em duas capitais brasileiras.

O processo de carbonatação no concreto ocorre quando o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] presente nos produtos de hidratação reage com o dióxido de carbono (CO_2), existente no meio ambiente, para formar o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), composto que diminui a alcalinidade do concreto devido ao seu pH ser mais baixo que o hidróxido consumido (aproximadamente 9,4 em temperatura ambiente). Tem-se que a carbonatação em concretos não-armados é uma vantagem nas primeiras idades, uma vez que resulta no aumento da resistência pelo preenchimento dos poros. Entretanto, no caso de concretos armados e no decorrer do tempo, diversos trabalhos realizados no exterior [3-5] e no Brasil [2,6] apontam para problemas caso a profundidade de carbonatação penetre até a armadura. Com a diminuição do pH, a camada passivadora é destruída, deixando a barra sujeita à formação de compostos ferrosos expansivos, resultando em um aumento do volume em relação ao seu tamanho inicial e, consequentemente, ao surgimento de fissurações e lascamentos devido às tensões geradas pela expansão [4].

Assim, diversos modelos matemáticos para a avaliação da vida útil das estruturas em relação à corrosão das armaduras foram propostos ao longo do tempo. Andrade [7] catalogou algumas das formulações existentes para modelar tanto a penetração do CO_2 quanto a ação de cloretos no concreto. Possan [1] apresentou um modelo matemático para a previsão da vida útil de projeto de estruturas de concreto frente à ação da carbonatação, baseando-se na opinião de especialistas na área e em quatro métodos de previsão de vida útil: i) Experiências Anteriores; ii) Ensaios Acelerados; iii) Métodos Determinísticos e; iv)Métodos Estocásticos ou Probabilísticos.

Entretanto, o desenvolvimento de modelos da realidade exige amplo conhecimento dos fenômenos representados e clara identificação das variáveis relevantes. Porém, devido à complexidade dos modelos propostos atualmente e ao grande número de variáveis dos modelos de previsão, encontram-se algumas limitações. Um exemplo deste tipo de limitação é a influência dos macroclimas específicos de cada região do Brasil no processo de carbonatação do concreto. Por ter uma dimensão quase que continental, faz-se necessário saber a influência destes macroclimas específicos nos concretos, bem como a influência dos diferentes tipos de cimento frente a estes diferentes macroclimas.

Buscando contribuir com o entendimento da influência dos macroclimas das diferentes regiões do Brasil e dos diferentes tipos de cimento frente ao fenômeno da carbonatação, este trabalho apresenta resultados comparativos de dois locais de exposição natural: Porto Alegre (RS) e Belém (PA) e duas condições de exposição distintas: protegido ou não protegido da chuva.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Procurando compreender a influência de diversos fatores frente à penetração de CO_2, foi desenvolvido um programa experimental que, a partir das variáveis dependentes e independentes e dos materiais e métodos selecionados, pudesse gerar dados naturais e acelerados de carbonatação suficientes, de forma a subsidiar o ajuste de modelos de vida útil de concretos e argamassas em ambientes agressivos. A seguir, são descritos os fatores controláveis, a variável de resposta, os fatores não controláveis e as etapas do programa experimental, separadas em materiais e métodos adotados para a pesquisa.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

2.1 Variável de resposta

No presente trabalho, será apresentada como variável de resposta a distância obtida entre a superfície do corpo-de-prova e a frente de carbonatação, valor este expressado em milímetros.

2.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis deste projeto foram:

a)O tipo de cimento: CP IV e CP V – ARI;

b) O traço unitário em massa: traço 1:6,5. Utilizou-se sempre o teor de argamassa de 53%.

2.3 Fatores não-controláveis

Os fatores não controláveis deram-se principalmente em relação à variação entre os executores do experimento, a heterogeneidade do concreto e as condições climáticas de exposição.

2.4 Materiais

2.4.1 Cimento

A fim de situar a pesquisa no panorama nacional, foram escolhidos apenas cimentos empregados em larga escala ao redor do País. Para fins de caracterização, realizou-se a massa específica para cada tipo de cimento, segundo a NBR NM 23 [8]:

a) CP IV (Classe 32 MPa) – massa específica 2,79 g/cm³, NBR 5736 [9];

b) CP V ARI – massa específica 3,10 g/cm³, NBR 5733, [10].

2.4.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa oriunda do Rio Jacuí, região de Porto Alegre. Foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado seguindo-se os procedimentos sugeridos na ABNT NM 248 [11]. Os resultados obtidos da caracterização física e a composição granulométrica do agregado miúdo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização física do agregado miúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
Composição granulométrica	ABNT NM 248 [11]	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
		4,80	0	0
		2,40	6	6
		1,20	11	17
		0,60	20	37
		0,30	36	73
		0,15	23	96
		Fundo	4	100
Dimensão máxima característica (mm)	ABNT NM 248 [11]	4,80		
Módulo de finura	ABNT NM 248 [11]	2,29		
Massa unitária (kg/dm³)	ABNT NM 52 [12]	1,55		
Massa específica (kg/dm³)	ABNT NM 52 [12]	2,61		

2.4.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma rocha britada de origem basáltica que apresenta dimensão máxima característica de 19 mm de acordo com a norma ABNT NBR NM 248, [11] e massa específica de 2,93 kg/dm³ [13].

2.4.4 Água

A água utilizada na mistura dos concretos foi a disponibilizada pela rede pública de abastecimento de água, administrada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) da cidade de Porto Alegre, RS.

2.5 Métodos

2.5.1 Dosagem dos concretos

Foi empregado o método de dosagem do IPT/EPUSP [14] para moldagem dos corpos-de-prova de concreto, fixando o traço em 1:6,5 com um abatimento de 100 ± 20 mm. Para todos os concretos moldados, utilizou-se o teor de argamassa seca (α) de 53%.

2.5.2 Moldagem

Com o estudo de dosagem realizado, foram moldados corpos-de-prova prismáticos para os ensaios de carbonatação natural. Para cada tipo de cimento e relação a/c, foram moldados 21 corpos-de-prova de concreto com dimensões de 100 x 100 x 350 mm. Atentou-se para o fato de moldar todos os exemplares em uma única betonada, a fim de diminuir a variabilidade entre os espécimes de mesma composição. O equipamento utilizado foi uma betoneira de eixo inclinado.

Passadas 24h, os espécimes foram desmoldados e, em seguida, inseridos na câmara úmida para a cura.

Foram moldados também seis corpos-de-prova cilíndricos de concreto (100 x 200 mm) e de argamassa (50 x 100 mm) para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, de acordo com o método prescrito pela NBR 5738 [15].

Da mesma maneira que os exemplares prismáticos, os cilíndricos foram desmoldados após 24 h e inseridos na câmara úmida para a cura.

2.5.3 Cura

Após 24 h da moldagem dos exemplares, eles foram desmoldados e mantidos em uma câmara úmida até a idade de 28 d (Figura 4), sendo retirados apenas no momento da exposição nas idades pré-determinadas.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 1: Corpos de prova na câmara úmida

2.5.4 Definição dos locais e condições de exposição

A escolha das cidades para o envio dos corpos-de-prova ocorreu da necessidade de conhecer a influência de macroclimas específicos de cada região do Brasil no fenômeno de carbonatação dos concretos. Neste trabalho optou-se por mostrar os resultados referentes as cidades de Belém e Porto Alegre pela suas características distintas e pelo fato do congresso ocorrer em uma delas. Para cada cidade foram enviados pacotes contendo 36 exemplares ao total, sendo 24 destes expostos em condições externas protegidas e 12 expostos em condições externas desprotegidas.

2.5.5 Carbonatação natural

Após a moldagem e o envio dos corpos-de-prova para as diferentes cidades, os mesmos foram inseridos no ambiente quando do estabelecimento da data de começo do ensaio entre os colaboradores do projeto. Como mencionado anteriormente, os exemplares foram expostos em dois ambientes, porém posicionados sempre da mesma maneira, apoiados na menor face, de forma que a penetração do CO_2 se dê por meio das faces maiores, deixando uma distância mínima de aproximadamente 5 cm entre eles.
Baseado na análise da literatura, experiência da equipe e da data de chegada dos prismas em todas as cidades, foi estimada a periodicidade das primeiras leituras para o começo do ensaio. Desta forma, concretos com relação a/c de 0,65 sofreram sua primeira leitura aos dois meses. Munidos de uma noção inicial, foi então possível estabelecer a periodicidade das leituras subsequentes de forma adequada.

2.5.6 Determinação da profundidade carbonatada

A fim de se ter uma uniformidade em relação aos procedimentos de coleta de dados de carbonatação, foi estabelecida uma metodologia para a realização das medidas de profundidade. Esta metodologia consiste em retirar os corpos-de-prova do local de exposição, câmara de carbonatação ou meio ambiente, levando-os ao laboratório para que se possa

romper o exemplar em uma espessura mínima de 20 mm o mais plano possível. Em seguida é aspergida a solução de fenolftaleína, no máximo 2 min após a execução da fratura do corpo-de-prova, espera-se aproximadamente 1 min e realiza-se a medição da espessura de carbonatação com um paquímetro digital em 5 pontos para cada face da fatia extraída. Não realizar medições próximas aos cantos do prisma, pois ali há a sobreposição de frentes de carbonatação, gerando uma distorção dos resultados. Efetuada esta medição, retornar o corpo-de-prova remanescente ao local original de exposição, selando a face fraturada de forma que impeça a penetração de CO_2 naquele ponto.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na figura 2 está apresentada a evolução da carbonatação de concretos produzidos com cimento CP IV, para uma relação a/c de 0,65, trazendo uma comparação entre os locais de exposição (Belém ou Porto Alegre) e as condições (protegido ou desprotegido de intempéries). Já a figura 3 apresenta a evolução da carbonatação para os mesmos parâmetros de exposição alterando-se apenas o tipo de cimento, neste caso o CP V – ARI.

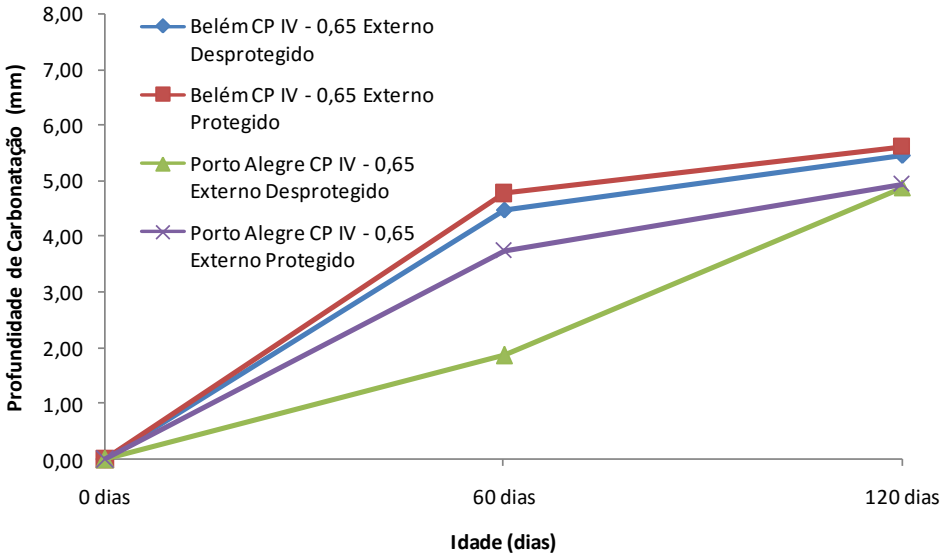

Figura 2: Profundidade de carbonatação para concretos moldados com CP IV

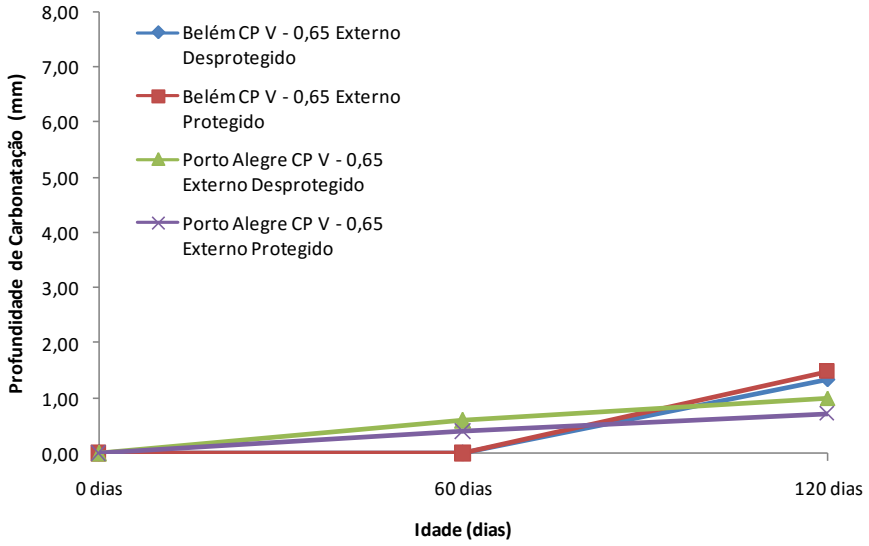

Figura 3: Profundidade de carbonatação para concretos moldados com CP V

3.1 Efeito do local de exposição na carbonatação

Nota-se, que o comportamento de ambos os cimentos segue o mesmo padrão em relação ao local de exposição. Dessa maneira, pode-se verificar que os concretos expostos em Porto Alegre tendem a carbonatar menos do que àqueles expostos em Belém. Isto ocorre devido às diferentes características climatológicas entre as duas cidades, como mostra a tabela 2. Em relação à umidade, não existe uma unanimidade na literatura quanto ao valor ótimo de umidade em que as reações de carbonatação aconteçam mais rapidamente, mas sim de um intervalo entre 40 e 85% [16]. Como a umidade relativa nas duas cidades apresenta-se dentro destes limites, o fator que governa a velocidade de carbonatação, neste caso, é a temperatura. Trabalhos realizados no Brasil e no exterior [3, 6, 17]apontam para uma grande influência que a temperatura exerce na velocidade das reações, já que com seu aumento a mobilidade das moléculas cresce, acelerando as reações químicas como a carbonatação.

Tabela 2 –Condições climatológicas das cidades durante o período de 26/06/2012 à 15/11/2012 [18]

Dados ambientais	Porto Alegre	Belém
Umidade Relativa (%)	74,55	79,51
Temperatura (°C)	18,00	27,00

3.1 Efeito da condição de exposição na carbonatação

A respeito das condições de exposição, verificou-se que os concretos inseridos na condição protegida da ação das intempéries tendem a apresentar uma maior profundidade de carbonatação quando comparadas com os exemplares inseridos na condição desprotegida. À exceção do CP V em Porto Alegre em que o corpo-de-prova desprotegido carbonatou mais. Entretanto espera-se que para as próximas idades esse comportamento se reverta, seguindo o padrão dos outros resultados e de pesquisas nesta área [19]. Tal fenômeno ocorre devido a diminuição da permeabilidade da matriz cimentícia pelo preenchimento dos poros devido à ação da água da chuva (saturação superficial).

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a evolução nas profundidades de carbonatação em função do tempo de exposição em diferentes climas brasileiros, condições de exposição e tipos de cimento. Por meio da análise dos corpos-de-prova expostos ao ambiente e com o auxílio de uma solução de fenolftaleína foi possível identificar linhas de tendência corroborando com o encontrado na literatura. A influência do clima e das condições de proteção pôde ser verificada pelos resultados obtidos. Para uma mesma relação a/c e tipo de cimento os exemplares em Belém e protegidos da ação de intempéries sofreram uma maior carbonatação que em relação aos outros seguindo esta ordem: Belém protegido > Belém desprotegido > Porto Alegre protegido > Porto Alegre desprotegido.

5. REFERÊNCIAS

[1] POSSAN, E. *Modelagem estocástica da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

[2] DAL MOLIN, D.C.C. *Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul*. 1988. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

[3] ABREU, A. G. *Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

[4] NEVILLE, A.M. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

[5] CASTELLOTE, M. et al. *Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO2 concentrations.Materials and Structures*, v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

[6] HELENE, P. R. DO L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. p. 248, 1993. Tese de Livre Docência. Escola Politecnica da da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo.

[7] ANDRADE, J.J.O. *Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão da Armadura*: Iniciação por Cloretos. 2001. 278p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5736*: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733*: Cimento Portland de alta resistência. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 248*: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52*: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 53*: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
[14] HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: PINI, 1992. 349p.
[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738*: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
[16] PAULETTI, Cristiane. *Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
[17] TUUTI, K.. *Corrosión of Steel in Concrete*. 1982. Tese (Doutorado). Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Estocolmo.
[18] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Dados históricos*. 2016. Disponível:< http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep >. Acesso 17/03/2016.
[19] ISAIA, G. C.; et al. *Carbonatação acelerada e natural do concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar*. In CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43°, 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 2001, 16p.