

Análise da absorção de água por capilaridade em concreto utilizando modelo de raiz quadrada do tempo

Capillary water absorption analysis in concrete using square root of time model

RESUMO

Thiago Alessi Reichert
thiagoreichert@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Carlos Eduardo Tino Balestra
carlosbalestra@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

A durabilidade de estruturas de concreto armado está condicionada à entrada de água e ao transporte de agentes agressivos nela dissolvidos. Assim, o coeficiente de absorção por capilaridade é aplicado na avaliação do fenômeno da absorção de água no concreto. O ensaio de absorção foi realizado conforme os procedimentos da norma brasileira, contudo, ela não determina o método de processamento dos resultados. Neste trabalho, utilizou-se o método mais empregado nos estudos internacionais sobre o tema, expressando a absorção por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo. Com o intuito de investigar a influência das zonas de agressividade marinha sobre as propriedades de absorção, cinco estruturas reais foram selecionadas. Por meio de regressões lineares, foram obtidas as equações dos dados de absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo. Assim, verificou-se que o mecanismo de absorção capilar é semelhante para as diferentes estruturas, sendo a variabilidade dos dados explicada pelas características dos concretos. Por isso, os resultados puderam ser processados com base no modelo de raiz quadrada do tempo, que representou, em média, 82,2% dos dados. Portanto, conclui-se que a absorção de água por capilaridade está relacionada às propriedades do concreto, mas é independente da zona de agressividade marinha.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais de construção - Vida útil. Análise de regressão. Concreto armado.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



The durability of reinforced concrete structures is dependent on the water ingress and the transport of aggressive agents dissolved in it. Thus, the capillary absorption coefficient is applied to evaluate the phenomenon of water absorption in concrete. The absorption test is performed according to the procedures of the Brazilian Standard, however, it does not determine the method of processing the results. In this paper, the method most used in international studies on the subject was applied, expressing the absorption by capillarity as a function of the square root of time. In order to investigate the influence of marine aggressive zones on absorption properties, five real structures were analyzed. Through linear regressions, the equations of capillary absorption data as a function of square root of time were obtained. Thereby, it was found that the capillary absorption mechanism is similar for different structures, and the variability of data are explained by the characteristics of the concretes. Hence, the results could be processed based on the square root of time model, which represented, on average, 82.2% of the data. Therefore, it is concluded that the water absorption by capillarity is related to the concrete properties, but is independent of the marine aggressive zone.

KEYWORDS: Building materials - Shelf life. Regression analysis. Reinforced concrete.

INTRODUÇÃO

Estudos desenvolvidos nas últimas décadas mostram que a durabilidade das estruturas de concreto armado está condicionada à entrada de água e ao transporte de agentes agressivos nela dissolvidos (ABYANEH; WONG; BUENFELD, 2014). Para concretos não saturados, a absorção de água por capilaridade destaca-se como o mecanismo predominante de transporte de fluidos em materiais porosos. De modo geral, verifica-se que quanto menor a taxa de absorção por capilaridade, maior será a vida útil da estrutura de concreto (MCCARTER; ALASWAD; SURYANTO, 2018).

Desse modo, o coeficiente de absorção por capilaridade pode ser aplicado com o intuito de avaliar o fenômeno de absorção de água no concreto. Esse coeficiente pode ser utilizado, então, na estimativa da vida útil das estruturas, baseada em modelos que correlacionem a degradação da estrutura com a absorção de água (MCCARTER; ALASWAD; SURYANTO, 2018).

O ensaio de absorção de água por capilaridade, baseado em técnica semidestrutiva, é frequentemente utilizado para determinar o coeficiente de absorção capilar, que quantifica o processo de transporte de água no concreto, expressando a taxa com que a água é absorvida para os seus poros (FENG; JANSSEN, 2018). Neste trabalho, foram realizados ensaios de absorção, conforme o procedimento da ABNT NBR 9779:2012. Desse modo, foram determinados os coeficientes de absorção com base no método de incrementos de massa, expressando a sua variação em função do tempo.

Contudo, apesar de normatizar o procedimento experimental, a norma brasileira é incompleta, pois não determina o método de processamento de dados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade. Atualmente, o método mais empregado consiste em expressar a absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo, por um modelo de regressão linear com os dados do ensaio de absorção (AL-NADDAF, 2018; FENG; JANSSEN, 2018).

Assim, foram comparados os dados de ensaios de absorção por capilaridade de cinco corpos de prova, com o intuito de investigar a influência das zonas de agressividade marinha sobre as propriedades de absorção por capilaridade. Para isso, os corpos de prova foram extraídos de cinco estruturas de concreto armado expostas a condições naturais de degradação, presentes, a mais de 40 anos, em diferentes zonas de agressividade marinha, na Ilha dos Arvoredos, em Guarujá/SP.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudo da influência das zonas de agressividade marinha sobre as propriedades do concreto relacionadas à vida útil de estruturas (neste trabalho, a absorção de água por capilaridade), foram selecionadas cinco estruturas: a Estrutura 1 é uma plataforma construída para guardar pequenas embarcações, quando as condições meteorológicas fossem desfavoráveis à navegação. A Estrutura 2 é uma escadaria, que permite acessar desde a Estrutura 5 até os pontos mais altos da ilha. A Estrutura 3 é utilizada para armazenar equipamentos e ferramentas de construção, localizando-se em uma região com grande incidência de respingos, devido à quebra das ondas. A Estrutura 4 é outra escadaria executada em concreto armado, sendo utilizada para acessar a formação rochosa sobre a qual

a Estrutura 3 está apoiada. A Estrutura 5 trata-se de um muro de concreto que delimita um tanque de água salgada, utilizado em estudos marinhos.

Essas estruturas de concreto armado foram anteriormente analisadas por Balestra (2017) em estudos de perfis de concentração de cloretos. Destaca-se, dos resultados destas análises, a necessidade de estudos sobre a influência das propriedades do concreto no fenômeno da corrosão das armaduras.

Cinco corpos de prova cilíndricos ($\varnothing = 75 \text{ mm}$) foram extraídos das cinco estruturas de concreto armado selecionadas para o estudo. Assim, apresenta-se, no Quadro 1, um resumo das características dos corpos de prova dessas estruturas, quanto identificação, estrutura de origem e zona de agressividade marinha.

Quadro 1 – Informações sobre os corpos de prova extraídos

Identificação	Estrutura	Zona de Agressividade Marinha
CP1	1 - Plataforma	Atmosfera Marinha
CP2	2 - Escadaria A	Atmosfera Marinha
CP3	3 - Depósito	Atmosfera Marinha
CP4	4 - Escadaria B	Respingos de Maré
CP5	5 - Tanque	Variação de Maré

Fonte: Os autores (2019).

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, foram realizados os procedimentos conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012): após determinação da massa seca (m_s , em gramas), os corpos de prova foram inseridos em um recipiente preenchendo-o com água até o nível estar (5 ± 1) mm acima de sua face inferior. Em intervalos de 3 h, 6 h, 24h, 48 h e 72 h (contadas a partir do contato com a água), foram determinadas as massas saturadas (m_{sat} , em gramas). Para cada um desses intervalos, foi calculado o coeficiente de absorção de água por capilaridade (C , em g/cm^2), por meio da Eq. (1), onde A é a área da seção transversal (em cm^2).

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (1)$$

Contudo, a ABNT NBR 9779:2012 não determina o método de processamento dos dados do ensaio. Nesse sentido, a teoria do fluxo insaturado em solos fornece suporte teórico às leis de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo, sendo esse o princípio do método de absorção mais aplicado atualmente (AL-NADDAF, 2018; FENG; JANSSEN, 2018). Decorre da equação de Darcy estendida que, para um sólido poroso inicialmente seco, a massa de água absorvida Δm é proporcional à raiz quadrada do tempo t (GUMMERSON; HALL; HOFF, 1980).

Quando a absorção capilar é avaliada por unidade de área pode-se escrever essa relação conforme a Eq. (2), relacionando a área da face de entrada A (que corresponde à área de seção transversal, em contato com a água) e uma constante característica do material k (GUMMERSON; HALL; HOFF, 1980).

$$C = \frac{\Delta m}{A} = k \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Desse modo, o ensaio consiste na determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade C , previsto pela ABNT NBR 9779:2012, que corresponde a expressão $\Delta m/A$, no lado esquerdo da Eq. (2). Em seguida, os dados obtidos ao

longo do ensaio de cada corpo de prova, expressos em termos de incrementos de massa, são submetidos à uma regressão linear e, utilizando o método dos mínimos quadrados, obtém-se a constante k de melhor ajuste à equação de absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade (em g/cm^2), determinados por meio da Eq. (1), são apresentados na Tabela 1, para os horários de análise determinados pela ABNT NBR 9779:2012. Esses dados permitem acompanhar a variação da taxa de absorção capilar em função do tempo.

Tabela 1 – Absorção de água por capilaridade (g/cm^2)

Corpo de prova	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
CP1	0,254	0,337	0,579	0,713	0,806
CP2	0,249	0,301	0,462	0,539	0,613
CP3	0,346	0,437	0,727	0,856	0,978
CP4	0,235	0,301	0,498	0,600	0,677
CP5	0,439	0,607	1,050	1,292	1,437

Fonte: Os autores (2019).

É possível observar, com base nos dados da Tabela 1, que a absorção de água por capilaridade aumenta em todos os corpos de prova, conforme o tempo de exposição ao ensaio. Contudo, significativas diferenças são verificadas ao comparar os corpos de provas extraídos das diferentes estruturas.

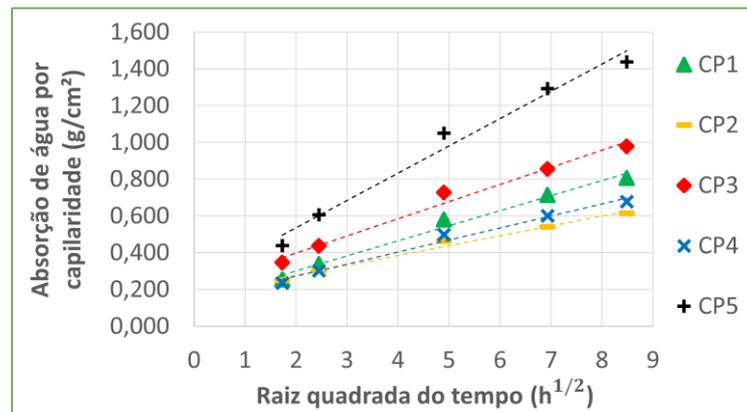
Em uma abordagem inicial, observou-se que o CP5, presente em zona de variação de maré, apresentou os maiores valores de absorção por capilaridade, enquanto o CP4, presente em zona de respingos, apresentou resultados entre os menores valores de absorção observados. Assim, como a zona de respingos está localizada entre as zonas de variação de maré e de atmosfera marinha, é interessante observar, além das zonas de agressividade marinha, as variações nos resultados relacionadas às propriedades do concreto. Uma vez que os corpos de prova são oriundos de diferentes estruturas, são esperadas variações significativas das propriedades dos concretos empregados na execução das estruturas.

Ao comparar os resultados para os corpos de prova CP2 e CP4, observa-se que, embora pertencentes a diferentes estruturas e presentes em diferentes zonas de agressividade marinha (atmosfera marinha e respingos, respectivamente), os corpos de prova apresentam valores de absorção de água por capilaridade semelhantes. Desse modo, pode-se inferir que a capacidade de absorção é independente da zona de agressividade marinha e a semelhança nos resultados possivelmente está relacionada a concretos com características semelhantes.

Assim, visando analisar somente a influência quanto as propriedades do material, foram comparados os dados de absorção dos CP2 e CP3. Os resultados desses corpos de prova, pertencentes a mesma zona de agressividade (atmosfera marinha), demonstraram que a variação dos valores de absorção está relacionada às diferenças nas propriedades dos concretos.

Na Figura 1, os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade foram processados com base no modelo de raiz quadrada do tempo, apresentando os coeficientes de absorção (em g/cm²), apresentados na Tabela 1, em função da raiz quadrada do tempo (em horas), conforme a Eq. (2).

Figura 1 – Processamento de dados pelo modelo de raiz quadrada do tempo



Fonte: Os autores (2019).

Observa-se que o mecanismo de absorção capilar é semelhante, mesmo para estruturas presentes em diferentes zonas de agressividade marinha. Assim, o efeito da variabilidade dos concretos empregados será verificado através da constante característica do material k do modelo de raiz quadrada do tempo.

Foi realizada regressão linear, para cada conjunto de dados, de modo a obter a equação da reta de melhor ajuste, conforme a Eq. (2). Com isso, foram determinados os coeficientes de absorção k de cada corpo de prova, com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade

Corpo de prova	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
k (g · h ^{-1/2} · cm ⁻²)	0,1038	0,0808	0,1272	0,0881	0,1866
R^2	0,8978	0,6606	0,8174	0,8354	0,8981

Fonte: Os autores (2019).

Com base nos dados da Tabela 2, o modelo de raiz quadrada do tempo apresentou R^2 médio de 0,8219, para os corpos de prova estudados. Isso significa que o modelo explica, em média, 82,2% da variação da absorção capilar apresentada ao longo dos ensaios. Com isso, pode-se concluir que a absorção de água por capilaridade é dependente das propriedades do concreto que constitui as estruturas e da raiz quadrada do tempo de absorção.

CONCLUSÃO

Os resultados mostram que a absorção de água por capilaridade está relacionada às propriedades do concreto que constitui as estruturas, mas é independente da zona de agressividade marinha. Portanto, o ingresso de íons agressivos, e a consequente durabilidade das estruturas, é dependente das características da rede de poros do concreto.

As características de absorção por capilaridade são semelhantes, de modo que, os resultados puderam ser processados com base no modelo de raiz quadrada do tempo, em que a massa de água absorvida é proporcional à raiz quadrada do tempo de absorção. O modelo de raiz quadrada do tempo representou, em média, 82,2% da variação da absorção capilar apresentada ao longo dos ensaios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária – Paraná, pelo auxílio financeiro ao desenvolvimento das pesquisas, à Fundação Fernando Lee, pelo apoio durante os trabalhos na Ilha dos Arvoredos, e à UTFPR – Câmpus Toledo.

REFERÊNCIAS

ABYANEH, S. D.; WONG, H. S.; BUENFELD; N. R. Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach. **Computational Materials Science**, v. 87, p. 54-64, maio 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025614000767>. Acesso em: 22 dez. 2018.

AL-NADDAF, M. A new automatic method for continuous measurement of the capillary water absorption of building materials. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 639-643, jan. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181732319X>. Acesso em 22 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BALESTRA, Carlos E. T. **Análise de perfis de concentração de cloretos em estruturas de concreto reais expostas em ambiente marinho**. 2017. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

FENG, Chi; JANSSEN, Hans. Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test. **Building and Environment**, v. 134, p. 21-34, abr. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318301100>. Acesso em: 22 dez. 2018.

GUMMERSON, R. J.; HALL, C.; HOFF, W. D. Water movement in porous building materials—II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. **Building and Environment**, v. 15, p. 101-108, 1980. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132380900153>. Acesso em: 22 dez. 2018.

MCCARTER, W. J.; ALASWAD, G.; SURYANTO, B. Transient moisture profiles in cover-zone concrete during water absorption. **Cement and Concrete Research**, v. 108, p. 167-171, jun. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617313662>. Acesso em: 21 dez. 2018.