

Monitoring the carbonation front progress in a cementitious composite having its pore structure analyzed through μ -CT imaging

Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação em compósito cimentício com sua estrutura de poros analisada por microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT)



E. LACERDA^a
evando.lacerda@bol.com.br

A.G. MAGALHÃES^a
aldom@ufmg.br

E. E. BERNARDES^a
elenbernardes@gmail.com

E. H. M. NUNES^b
eduardohmn@gmail.com

W. L. VASCONCELOS^b
wlv@demet.br

Abstract

The carbonation process is one among the primary factors that cause a reduction in the hydrogen ionic potential (pH) of cementitious composites that may lead to a depassivation of the reinforcement structures, thus furnishing conditions for corrosion processes to begin. In this paper, the research sought to monitor the advancement of the carbonation front in compliance with the European standard, EN 14630, whilst concurrently measuring the pH variation on the surface of the cementitious composite. Cylindrical mortar specimens of (2x4) cm were placed in a carbonation chamber, keeping up the humidity 65%, temperature 28° C and a CO₂ concentration of 5%. The structure of voids in the matrix was assessed with the μ -CT imaging technique. The pH reading enabled the monitoring of the carbonation front progress as a function of the loss of alkalinity, before the process established by standard EN 14630. The images obtained by μ -CT did not enable the visualization of the densification of the material found in the outer layer of the specimen.

Keywords: mortar, carbonation, pH, Xray microtomography.

Resumo

O processo de carbonatação é um dos causadores da redução do potencial hidrogeniônico (pH) em compósitos cimentícios, o qual pode levar a despassivação das armaduras, dando condições ao início de um processo de corrosão. Neste trabalho, buscou-se acompanhar o avanço da frente de carbonatação conforme a norma europeia EN 14630 paralelamente à medição da variação do pH na superfície do compósito cimentício. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos (CP) de argamassa, com dimensão de (2x4) cm, acondicionados em câmara de carbonatação com condições controladas, mantendo-se a umidade em 65 %, a temperatura em 28° C e a concentração de CO₂ em 5 %. A estrutura de vazios da matriz foi avaliada por meio da técnica de microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT). A leitura de pH permitiu um monitoramento do avanço da frente de carbonatação, em função da perda de alcalinidade, antes do processo estabelecido na norma EN 14630. As imagens obtidas por meio da μ -CT não permitiram visualizar a densificação do material presente na camada mais externa do CP.

Palavras-chave: argamassa, carbonatação, pH, microtomografia de raios X.

^a UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Belo Horizonte, MG, Brasil;
^b UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1. Introdução

O fenômeno da carbonatação nos compósitos se dá em decorrência da difusão do gás carbônico (CO_2) na estrutura dos poros de sua matriz, onde é dissolvido, formando o ácido carbônico (H_2CO_3), o qual reage com os álcalis da solução ali presente e, principalmente, com o hidróxido de cálcio, formando o carbonato de cálcio [1-4].

O carbonato de cálcio formado (CaCO_3), contribui para o preenchimento dos poros superficiais, reduzindo a difusibilidade no material e, conseqüentemente, a velocidade do avanço da frente da carbonatação [5, 6]. Em vista disso, a carbonatação ocorre com grande velocidade no início, progredindo mais lentamente para uma profundidade máxima [1, 3]. O CaCO_3 produzido não representa, por si só, uma ação deletéria para os compósitos cimentícios, mas o consumo dos álcalis, durante o fenômeno descrito, leva à redução do potencial hidrogeniônico (pH) das soluções intersticiais dos poros e capilares que, em condições naturais, possuem pH altamente básico (usualmente entre 12,6 e 13,5) [3]. Nos casos das estruturas armadas, a perda de alcalinidade pode levar à despassivação das armaduras, dando condições ao início de um processo de corrosão, que pode ocasionar a redução da vida útil das construções [4, 6, 7].

A utilização de uma solução à base de fenolftaleína aspergida na superfície dos compósitos de matriz cimentícia, por ser um método simples e de baixo custo, é a técnica mais conhecida e empregada para se estimar a profundidade da frente de carbonatação no material, sendo recomendado pela RILEM CPC-18 [8] e pela CEN BS EN 14630 [9]. Entretanto, o ensaio apresenta algumas deficiências, uma vez que a faixa de viragem¹ desta solução só ocorre quando o pH atinge valores entre 8,0 e 10,0 [10, 11]. Em vista disso, a solução de fenolftaleína demonstra limitações no monitoramento da profundidade da carbonatação, não sendo capaz de detectar o início da faixa de perda de alcalinidade que pode levar à despassivação das armaduras, que pode ocorrer a partir de valores de pH menores que 11,8 [3, 6, 12].

Este estudo buscou monitorar o avanço da frente de carbonatação utilizando o indicador de fenolftaleína conforme os padrões da norma europeia BS EN 14630 [9] e pela medição da variação do pH, utilizando-se equipamento específico para superfícies de compósitos de matriz cimentícia. O uso deste dispositivo permitiu um monitoramento eficiente da variação do potencial hidrogeniônico induzido pela carbonatação.

Paralelamente, utilizou-se a técnica de microtomografia de raios X (μ -CT), para avaliação da estrutura de vazios de um dos cor-

Tabela 1

Propriedades físicas do cimento CP V utilizado

Características e propriedades		Unidade	Cimento utilizado	Limites NBR 5733
Finura	Resíduo na peneira 75 μm Área específica	% m^2/kg	≤ 6 480,8	≤ 6 ≥ 300
Tempo de início de pega		min	129	≥ 60
Tempo de fim de pega		min	184	≤ 600
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5	≤ 5
Resistência à compressão	1 dia de idade	MPa	28,5	≥ 14
	3 dias de idade	MPa	40,5	≥ 24
	7 dias de idade	MPa	44,3	≥ 34

Tabela 2

Propriedades químicas do cimento CPV utilizado

Determinações químicas	Cimento utilizado (% da massa)	Limites NBR 5733 (% da massa)
Resíduo insolúvel (RI)	0,79	$\leq 1,0$
Perda ao fogo (PF)	3,75	$\leq 4,5$
Óxido de magnésio (MgO)	0,69	$\leq 6,5$
Trióxido de enxofre (SO_3)	2,98	$\leq 4,5$
- quando C3A do clínquer - 8%	2,89	$\leq 3,5$
- quando C3A do clínquer > 8%	-	$\leq 4,5$
Anidrido carbônico (CO_2)	2,61	$\leq 3,0$
Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	4,90	-
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	3,05	-

Nota: O cálculo da percentagem do Aluminato Tricálcico contido no clínquer deve ser feito pela seguinte fórmula: $(\text{C}_3\text{A}\%) = 2,65 \times (\text{Al}_2\text{O}_3\%) - 1,692 \times (\text{Fe}_2\text{O}_3\%)$.

¹ Momento em que duas substâncias em contato chegam numa fase crítica da reação. Esta passagem é visível a olho nu, denunciada por uma mudança brusca de cor.

Tabela 3

Frações granulométricas da areia normal

Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Abertura nominal peneira	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	16	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	30	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	50	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	100	Fina

pos de prova ensaiados. Por se tratar de uma técnica não destrutiva e que não demanda preparação especial da amostra, o uso da μ -CT permitiu quantificar o tamanho, a distribuição e a conectividade dos poros do CP, sem provocar alterações na estrutura original do CP.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI), cujas propriedades físicas e químicas atendem à norma NBR 5733 [13]. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização deste material.

2.2 Areia

Foi utilizada a "Areia Normal Brasileira" produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A Tabela 3 apresenta as frações granulométricas da areia normalizada, segundo a NBR 7214 [14].

2.3 Dosagem, moldagem e cura dos corpos de prova

A argamassa foi produzida na proporção 1:3 (cimento: areia) com um fator água/cimento (a/c) de 0,60. As quantidades utilizadas na dosagem são mostradas na Tabela 4.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de

Tabela 4

Quantidade de materiais por dosagem

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624,0 \pm 0,4
Água	374,4 \pm 0,2
Areia normalizada	-
- fração grossa	468,0 \pm 0,2
- fração média grossa	468,0 \pm 0,2
- fração média fina	468,0 \pm 0,2
- fração fina	468,0 \pm 0,2

argamassa, com dimensões de (2x4) cm. A adoção de CPs com tamanho reduzido teve o intuito de compatibilizar a amostra à capacidade de leitura do microtomógrafo utilizado [15].

A moldagem dos corpos de prova tomou como base os procedimentos estabelecidos na NBR 7215 [16] e foi realizada em ambiente com umidade relativa de (65 \pm 2) % e temperatura de (26 \pm 1,0) °C.

Foram moldados 12 corpos de prova com dimensão de (2 x 4) cm, sendo 11 CPs destinados à câmara de carbonatação e 1 CP utilizado para determinação do pH inicial do material (referência).

Dos 11 CPs, submetidos ao processo de carbonatação acelerada, 10 foram utilizados nos ensaios de medição de pH e aspersão de fenolftaleína e 1 CP foi utilizado nos ensaios de μ -CT.

O adensamento foi realizado em mesa vibratória. Os moldes metálicos foram totalmente preenchidos com a argamassa e vibrados por 10 segundos. O tempo de adensamento foi previamente ajustado levando-se em conta a consistência da argamassa produzida.

Após a etapa de moldagem, os CPs foram mantidos em câmara úmida com temperatura controlada de (23 \pm 2) °C e umidade relativa (UR) maior que 95 % por um período de 24 horas. Após a cura inicial, foram desmoldados e mantidos submersos em tanque contendo água potável por mais 48 horas, até o momento das primeiras medições de pH, antes de serem colocados na câmara de carbonatação.

**Figura 1**

Medição do pH em um CP (2x4) cm



Figura 2
Câmara de carbonatação – condições de exposição dos corpos de prova

2.4 Medições do pH e da frente de carbonatação

Ao terceiro dia de idade, os corpos de prova foram retirados do tanque de cura para a etapa de medição do pH de seu topo e base. Para tanto, foi utilizado o equipamento ExStik® PH150-C específico para medição quantitativa do pH (mede os íons de hidrogênio na solução) em superfícies de materiais cimentícios.

As medições foram realizadas em amostras com superfície seca, sendo aspergida água deionizada na região de contato com a sonda, conforme mostrado na Figura 1 [17]. O equipamento foi calibrado em soluções padrão de pH iguais a 4, 7 e 10 antes de cada uso.

Após a medição inicial do pH, 11 corpos de prova foram acondicionados em câmara de carbonatação, modelo Thermo Scientific Steri-Cult® CO₂, ficando expostos a condições estáveis de umidade relativa a (65 ± 1) %, temperatura a (28,0 ± 0,5) °C e concentração de dióxido de carbono (CO₂) a (5,0 ± 0,1) %, conforme mostrado na Figura 2, até o dia previsto para a realização dos ensaios. As condições aqui definidas tomaram como base outros estudos sobre carbonatação [3, 4, 18]. O corpo de prova remanescente foi utilizado para determinação do pH de referência aos 3 dias de idade.

Aos 2, 5, 7, 12, 14, 16, 18, 21, 23 e 25 dias de carbonatação, um corpo de prova foi retirado da câmara, para a realização dos ensaios de medição de pH e aspersão de solução de fenolftaleína. O pH foi medido na altura média da superfície lateral do corpo de prova e, em seguida, serrado ao meio perpendicularmente à sua altura com uma serra de disco. As duas faces resultantes foram limpas com um pincel, de modo a se remover o material pulverulento resultante do corte. Em uma das faces resultantes foi realizada a medição do pH. Em seguida foi aspergida uma solução de fenolftaleína na outra face serrada do corpo de prova de modo a se visualizar a profundidade média da frente de carbonatação conforme especificações da norma CEN 14630 [9].

Para se determinar a profundidade média de carbonatação, foi calculada a média de 16 medidas, realizadas com um paquímetro, a partir da face externa da seção até o limite da borda da região de coloração vermelho-púrpura. A avaliação da profundidade média de carbonatação também foi realizada com o auxílio de um software de análise de imagens.

As faces dos CPs aspergida com fenolftaleína foram fotografadas com uma câmera digital para, em seguida, se mensurar a profundidade da frente de carbonatação por meio do software ImageJ. O mesmo procedimento para medição do pH foi executado no corpo de prova de referência (idade de 3 dias), sem que o mesmo tenha sido submetido à câmara de carbonatação.

2.5 Microtomografia de raios X (μ -CT)

A microtomografia de raios X (μ -CT) é um ensaio não destrutivo que pode produzir informações em 3D com base no empilhamento de seções 2D enquanto o CP é rotacionado, fornecendo dados da microestrutura interna do material analisado, como densidade e estrutura de poros [19].

O ensaio da μ -CT foi realizado com um microtomógrafo modelo SkyScan 1172 de alta resolução, que opera com uma tensão de até 100 kV e potência de 10 W. O equipamento é gerenciado por um conjunto de quatro computadores conectados em rede que aumentam a capacidade de processamento e produção dos modelos 3D. Este conjunto é mostrado na Figura 3.

Para a leitura no microtomógrafo, um corpo de prova foi retirado da câmara após 14 dias de exposição e imediatamente embalado em filme de PVC, para se evitar a interação com o CO₂ presente no ar, sendo este removido no momento do ensaio.



Figura 3
Equipamentos para microtomografia de raios X, I - Microtomógrafo SkyScan 1172, II e III - Computadores de controle e aquisição de dados

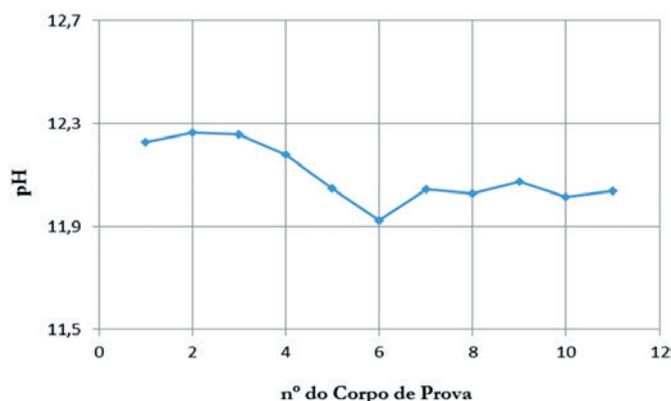


Figura 4
pH médio inicial dos corpos de prova não carbonatados

3. Resultados e discussões

3.1 Carbonatação e pH

A Figura 4 exibe a média dos valores dos pHs medidos na superfície do topo e da base de cada um dos onze corpos de prova ensaiados. Tais medidas foram feitas imediatamente antes destes serem colocados na câmara de carbonatação e após três dias de cura submersa. Verifica-se que todos apresentam uma boa alcalinidade, sendo o valor médio global das medidas igual a 12,10.

A Figura 5 exibe as médias das leituras dos pHs, realizadas na altura média da superfície lateral externa e no ponto central da seção de corte transversal de cada um dos corpos de prova, ensaiados após sua permanência por tempo pré-estabelecido na câmara de carbonatação. Verifica-se uma tendência mais acentuada de

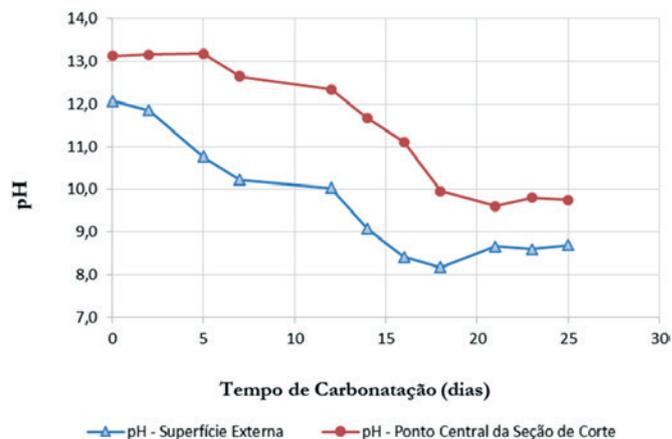


Figura 5
pH médio dos corpos de prova carbonatados

perda de alcalinidade nos primeiros dias, confirmando os dados já apresentados em outros estudos que demonstram que a carbonatação ocorre com grande velocidade no início, progredindo mais lentamente para uma profundidade máxima [1]. Observa-se também que a região central dos corpos de prova sofreu redução de alcalinidade antes mesmo de ser detectada pelo ensaio utilizando a solução de fenolftaleína.

Aos 14 dias o pH nas regiões mais externas do CP atingiu um valor de 9,07, o que fez com que o indicador de fenolftaleína demarcasse claramente uma faixa mais profunda, indicativa do avanço da frente de carbonatação, conforme mostrado na Figura 6. Observa-se que aos cinco dias já é possível notar a perda de alcalinidade, porém ainda de forma discreta, uma vez que o pH de 10,77 ainda se encontra fora da melhor faixa de viragem da solução de fenolftaleína, que usualmente ocorre quando o pH atinge valores entre 8 e 10.

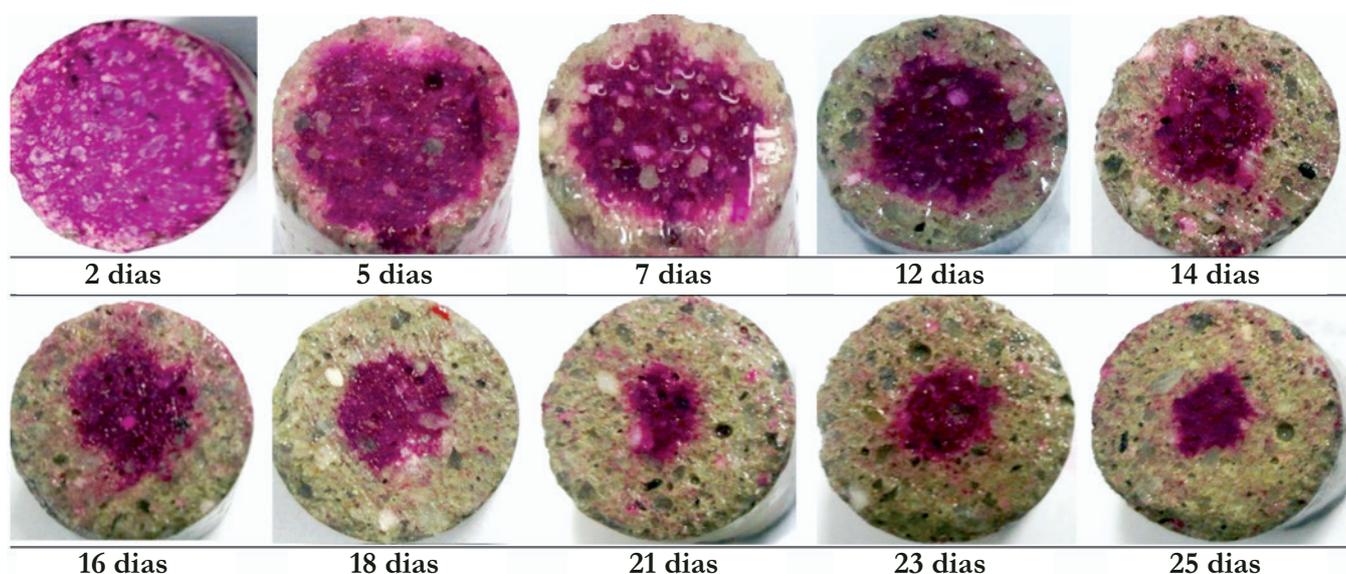


Figura 6
Avanço da frente de carbonatação por indicador de fenolftaleína

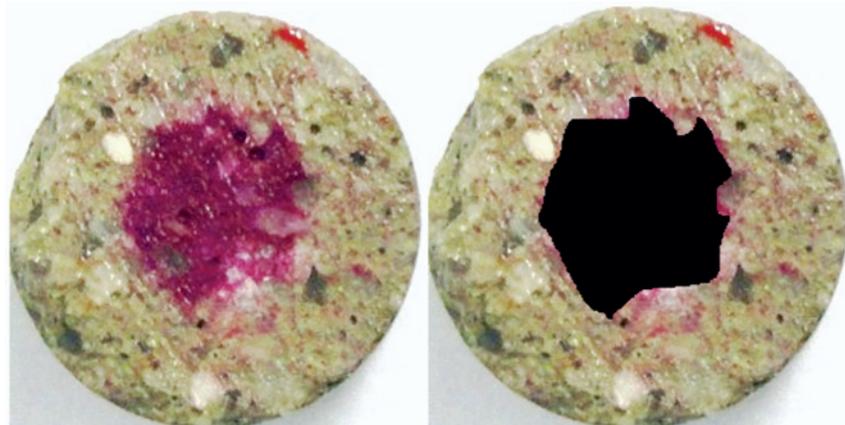


Figura 7
Imagem de um CP, após aspersão de fenolftaleína, prepara para ser analisada pelo ImageJ

A Figura 7 mostra uma imagem preparada para análise no ImageJ. A Figura 8 mostra o acompanhamento do avanço da frente de carbonatação, possível de ser detectada pelo uso da solução de fenolftaleína, conforme estabelecido pelos padrões da norma europeia CEN 14630 [9], e os resultados gerados com o auxílio do software. Com o intuito de se avaliar se há diferença significativa da média das medidas obtidas pelos dois métodos utilizados, foi aplicado o teste de hipótese, baseado na distribuição de probabilidade T de Student (ou teste estatístico T) para amostras independentes. A hipótese nula é de que a média é igual entre os dois grupos. A hipótese alternativa é de que a média é diferente. Se o p-valor, probabilidade de errar ao rejeitar a hipótese nula, for menor que 5%, rejeita-se a hipótese nula. Ou seja, assume-se que a média é diferente entre os dois grupos.

No caso desse estudo, o p-valor encontrado foi de 90,2 %, indicando que não há uma diferença significativa entre as medidas da profundidade de avanço da frente de carbonatação dos dois grupos [21].

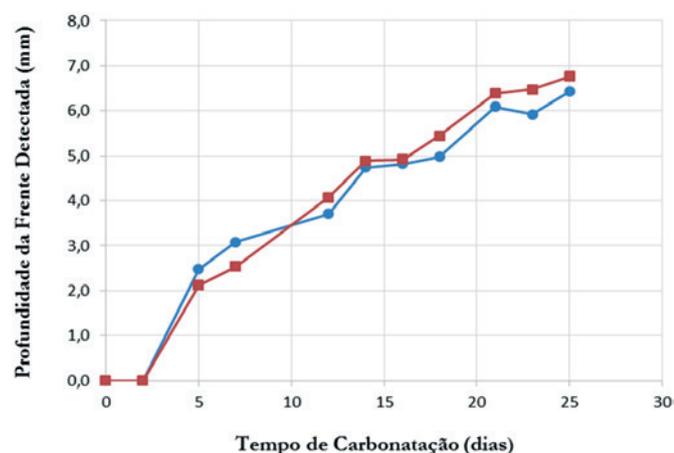


Figura 8
Profundidade da frente de carbonatação detectada pela solução de fenolftaleína

Nota-se que aos 25 dias de exposição dos corpos de prova, às condições preestabelecidas na câmara de carbonatação, a solução de fenolftaleína acusa um avanço da frente de carbonatação em torno de 6,4 mm. Cabe ressaltar que, o que está sendo medido é apenas a região onde o pH do material cimentício foi reduzido para níveis capazes de serem detectados por esse indicador de pH, e não a presença das reações do ácido carbônico (H_2CO_3) com os álcalis da argamassa.

Pode-se também observar na Figura 5 que, com apenas 14 dias de permanência na câmara, o ponto central da seção transversal de corte do CP, a 10 mm da borda, já havia atingido um valor de pH igual a 11,6. Tal valor já seria suficiente para permitir a despassivação do aço que, segundo Neville [3], pode ocorrer quando o pH atinge valores entre 11,4 e 11,8. Verifica-se também que, mesmo aos 18 dias de exposição e com o pH da região central igual a 10,03, a perda de alcalinidade ainda não poderia ser detectada pelo uso da solução.

3.2 Microtomografia de raios X

A Figura 9 mostra as imagens geradas a partir da leitura realizada no CP com 14 dias de exposição à câmara de carbonatação. Por meio dessas, pode-se fazer uma avaliação qualitativa da diferença de densidade no material.

Comparando as imagens binarizadas com as imagens em escala de cinza, conclui-se que o material presente na região mais externa (verde) do CP tem uma densidade menor, uma vez que na escala de cinza, esta região apresenta-se mais escura. Comportamentos semelhantes foram encontrados em outros estudos realizados [15]. Nesta análise, em particular, não foi possível detectar a densificação da camada mais externa do CP devido à formação do $CaCO_3$. No estudo realizado por Lydzba *et al.* [20] também não foi possível visualizar o avanço da frente de carbonatação por meio das imagens microtomográficas. Contudo, Jiande *et al.* [19], mediante o uso de um equipamento com tensão superior à utilizada neste estudo, conseguiram visualizar esta densificação.

A Tabela 5 mostra diversos parâmetros microestruturais do CP. Observando o Índice de Fragmentação (IF), constata-se que a co-

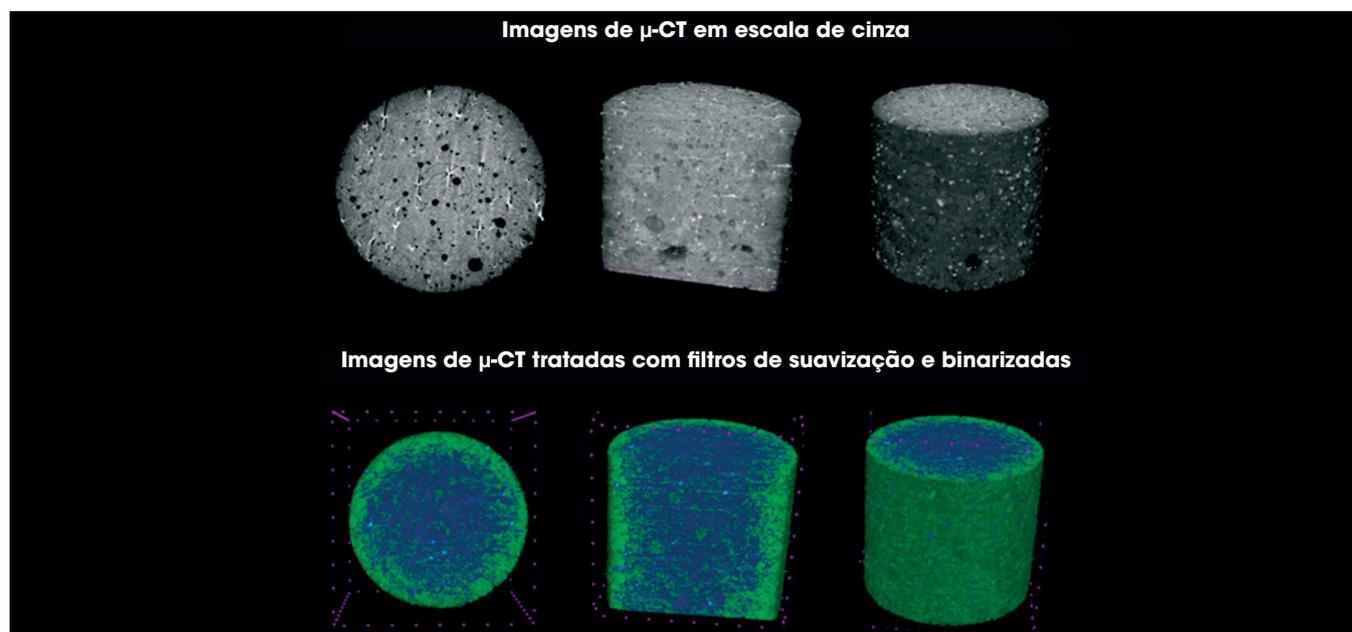


Figure 9
Imagens de μ -CT para em CP com 14 dias de exposição à câmara de carbonatação

Tabela 5
Quantidade de materiais por dosagem

Região do corpo de prova	Porosidade total (%)	Porosidade aberta (%)	Índice de fragmentação (μm^{-1})	Diâmetro médio dos poros (μm)
Global	$30,9 \pm 0,2$	$14,3 \pm 0,2$	$-0,0012 \pm 0,0002$	$37,8 \pm 0,1$
Região central ($\varnothing = 1 \text{ cm}$)	$19,4 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$0,0146 \pm 0,0003$	$36,5 \pm 0,1$

nectividade na região externa é superior ao da região central. A fragmentação é caracterizada pela ruptura da conectividade. Quanto mais negativo for o índice de fragmentação, maior será a conectividade dos poros, favorecendo a permeabilidade do sistema.

A porosidade aberta de $(14,3 \pm 0,2)$ % obtida para a região global, mostra-se bem superior aos $(1,8 \pm 0,1)$ % da região central de diâmetro igual a 1 cm. Esses resultados estão em concordância com os índices de fragmentação apresentados.

4. Conclusões

Observou-se que, apesar do uso da solução fenolftaleína ser um método muito útil para visualizar a existência de uma frente de carbonatação, pois é simples e barato, ele não foi capaz de fornecer informações sobre as regiões mais internas do corpo de prova onde ocorreram reações do ácido carbônico (H_2CO_3) com os álcalis da argamassa ocasionando a redução do potencial hidrogeniônico do material cimentício. Os resultados deste trabalho sugerem que a carbonatação atingiu profundidades superiores à linha indicada pela fenolftaleína.

Por sua vez, o monitoramento da variação do pH na superfície do

compósito cimentício mostrou-se também uma técnica simples e eficiente para acompanhar não só avanço da frente de carbonatação, mas também para fornecer uma boa referência quantitativa do valor do pH em um determinado ponto de análise.

Levando-se em conta que alguns estudos apontam a possibilidade da despassivação da armadura em meios cimentícios ocorrer quando o pH atinge valores menores que 11,8, precisar quantitativamente sua medida nas regiões onde seus valores se encontram acima da faixa de viragem da fenolftaleína, traz vantagens quando se busca garantir o tempo previsto de vida útil das estruturas.

O uso da microtomografia de raios X possibilitou quantificar diversos parâmetros microestruturais relevantes ao estudo da difusão do CO_2 no compósito cimentício. Para o equipamento de μ -CT utilizado neste estudo, as imagens geradas não permitiram a visualização da densificação das camadas mais externas do CP.

É importante salientar que, ambos os métodos utilizados para monitorar o pH não são capazes de indicar a razão pela qual ocorreu a perda da alcalinidade, seja esta por carbonatação ou por outras causas, como exposição à ácidos, por exemplo. Assim, nos casos de investigação onde o fator causador da redução do pH não é conhecido, são necessárias análises laboratoriais [9].

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro e a HOLCIM, pelo fornecimento do cimento utilizado nesta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- [1] HELENE, P. R. L., Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese de Livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993, 231 p.
- [2] HEWLETT, P. C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th edition, ed. Elsevier, Oxford, p. 324-334, 1998.
- [3] NEVILLE, A. M., *Properties of Concrete*. 5th edition. Pearson Education Limited, Harlow, England, 2012. 872 p.
- [4] BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS, S., A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases Científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução OSWALDO CASCUDO e HELENA CARASEK. 1o ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p.
- [5] TAYLOR, H. F. W., *Cement Chemistry*. 2o edition. London: Thomas Telford Publishing, 488 p. 1997.
- [6] RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P., *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. 1o ed. Rio de Janeiro, Elsevier Ed. 2014; p. 272.
- [7] KROPP, J., Relations between transport characteristics and durability In: *Performance Criteria for Concrete Durability*. KROPP, J.; HILSDORF, H. K., RILEM Report 12. London and New York, 1995, p. 97-102.
- [8] RILEM CPC-18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, 1988, p. 453-455.
- [9] CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. (BS EN 14630:2006). Brussels, Belgium, 2006.
- [10] YU, M. Y.; LEE, J. Y.; CHUNG, C. W., The Application of Various Indicators for the Estimation of Carbonation and pH of Cement Based Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 2010: vol. 38, No. 5.
- [11] MCPOLIN, D. O.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E., Carbonation and pH in concretes manufactured with supplementary cementitious materials. *J Mater Civil Eng*. 2009: 21, p.217–225.
- [12] FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R., *Corrosão das armaduras das estruturas de concreto*. México: Boletim técnico ALCONPAT Internacional. v. 6. 2013.
- [13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5733 /EB-2: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- [14] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2012.
- [15] BERNARDES, E. E.; MAGALHÃES, A.G.; VASCONCELOS, W.L.; NUNES, E.H.M., Evaluating of the effect of varying the workability in the concrete pore structure by using X-ray microtomography. *RIEM*, 6 (4), August (2013), 582-597.
- [16] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7215 (Incorpora a Errata nº 1 de 1997): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- [17] PU, Q.; JIANG, L.; XU, J.; XU, Y.; ZHANG, Y., Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. *Construction and Building Materials*, 2012: v.28, p.519–524.
- [18] PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D. C. C.; KASMIERCZAK, C. S.; BREZEZINSKI, D. Profundidade de carbonatação em ensaios acelerados com diferentes percentuais de CO₂ In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais em CD. Pernambuco, 2005.
- [19] JIANDE, H.; WEI, S.; GANGHUA, P., X-ray Microtomography of the Carbonation Front Shape Evolution of Cement Mortar and Modeling of Accelerated Carbonation Reaction. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Apr.2013: p.303-308.
- [20] LYDZBA, D.; RAJCZAKOWSKA, M.; STEFANIUK, D., Identification of the Carbonation Zone in Concrete Using X-Ray Microtomography. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXVI, No. 1, 2014.
- [21] DILONARDO, I.; VARHEN, C.; LEE, C.; FIGUEIREDO, A., Avaliação Metodológica da Medida de Carbonatação em Microconcretos. In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015, Bonito – MS. Anais... Bonito: CBC, 2015.