



CARBONATAÇÃO NATURAL DE CONCRETOS: RESULTADOS DE CERCA DE QUATRO ANOS DE MONITORAMENTO

Gibson Rocha Meira (1); Ivo José Padaratz (2); José Carlos Borba Júnior (3)

- (1) Departamento de Construção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba (CEFET-PB) – e-mail: gibson@jpa.neoline.com.br
(2) Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – e-mail: ecv1@ecv.ufsc.br
(3) Departamento de Construção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba (CEFET-PB) – e-mail: jocaborba@yahoo.com.br

RESUMO

Proposta: a carbonatação natural de concretos é um fenômeno que depende de características dos materiais e do ambiente, em um processo interativo simultâneo. O objetivo deste artigo é apresentar resultados de aproximadamente quatro anos de monitoramento da carbonatação de concretos em condições naturais de exposição, discutindo a influência de fatores ambientais e de características dos materiais empregados. **Método de pesquisa/Abordagens:** medidas de temperatura e umidade relativa ambientais, medidas do grau de saturação dos concretos, medidas da profundidade de carbonatação com aplicação de solução de fenolftaleína. **Resultados:** há uma evolução clássica da carbonatação para concretos mais porosos. Concretos iguais, expostos em zonas significativamente próximas, apresentaram comportamentos distintos em relação à carbonatação, resultado do comportamento de fatores ambientais e da sua interação com o concreto. A relação entre carbonatação e grau de saturação dos concretos é visível. Também foram estabelecidos coeficientes que representam a velocidade de avanço da frente de carbonatação para os diversos concretos e condições ambientais encontradas. **Contribuições/Originalidade:** estabelecimento da velocidade de avanço da frente de carbonatação para condições reais de exposição. Relação entre carbonatação e grau de saturação do concreto.

Palavras-chave: carbonatação, concreto, exposição natural, micro-ambientes.

ABSTRACT

Propose: natural carbonation of concretes is a phenomenon that depends on materials and environmental characteristics in a simultaneous interactive process. The aim of this paper is present results of near four years of carbonation of concretes exposed under natural conditions and discuss the influence of environmental factors and material characteristics itself. **Methods:** temperature and relative humidity measurements, measurements of saturation degree of concretes, carbonation depth measurements with phenolphthalein solution. **Findings:** there is a classical evolution of concrete carbonation for concretes with higher porosity. Same concretes exposed at close sites show different carbonation behaviour due to different environmental factors behaviour and its interaction with concrete. The relation between carbonation and saturation degree of concrete can be seen. There were also set carbonation velocity coefficients for all concretes and environmental conditions observed. **Originality/value:** setting rate of carbonation front advance for real exposition conditions. Relation between carbonation and saturation degree of concrete.

Keywords: carbonation, concrete, natural exposition, microenvironments.

1. INTRODUÇÃO

O aço imerso no concreto encontra-se estável em ambientes de elevada alcalinidade. Esta estabilidade decorre da formação da película de passivação, a qual se mantém estável enquanto o pH da solução dos poros, em sua maioria superior a 12, não reduz significativamente. Com a carbonatação, o concreto torna-se menos alcalino, chegando o pH a atingir níveis próximos de 8 (BAKKER, 1988; BENTUR et al., 1997; TUUTI, 1982; POURBAIX, 1974). Desta forma, a película de passivação perde a sua estabilidade, dando início ao processo de corrosão

Partindo da condição de que o concreto é um material poroso, a velocidade com que a frente de carbonatação avança depende da estrutura da sua rede de poros bem como das suas condições de umidade (BAKKER, 1988). Se os poros estiverem secos, o CO₂ penetra no concreto, mas a carbonatação não ocorre, pois falta água. Se os poros estiverem saturados, a carbonatação fica comprometida pela baixa velocidade de difusão do CO₂ na água. No caso dos poros parcialmente preenchidos por água, o que é comum nos concretos de cobrimento, a frente de carbonatação avança até onde os poros mantêm essa condição favorável.

ANDRADE (1992) relaciona a carbonatação com a umidade relativa do ar na Figura 1, mostrando que para níveis de UR entre 50 – 70% o processo de carbonatação é favorecido. No entanto, essa medida de umidade relativa pode sofrer variações acentuadas ao longo do dia. O grau de saturação do concreto, que tem relação direta com a UR, tem comportamento mais estável e reflete, diretamente, a quantidade de água nos poros do concreto.

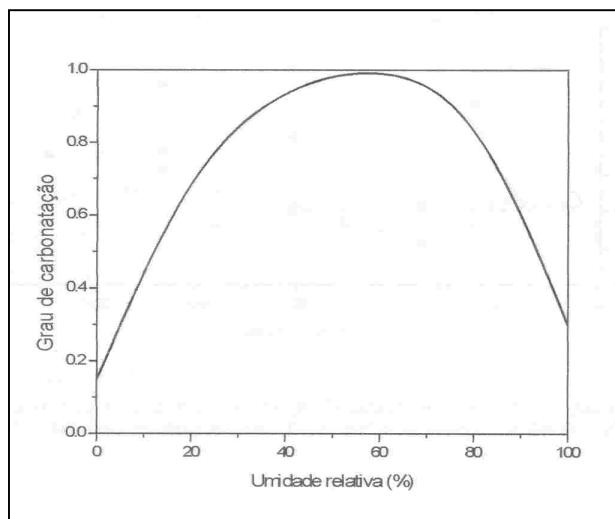


Figura 1 - Relação entre umidade relativa e grau de carbonatação (ANDRADE, 1992).

Para representar o avanço da frente de carbonatação, o modelo mais conhecido é o modelo da raiz quadrada do tempo: $x_{carb} = k_{carb} \sqrt{t}$, apresentado por TUUTI (1982), onde x_{carb} representa a profundidade carbonatada, t é o tempo de exposição e k_{carb} é uma constante que representa a velocidade de avanço da frente de carbonatação e depende das características do concreto e do ambiente (ANDRADE, 1992; HO & LEWIS, 1987).

2. OBJETIVO

Este trabalho avalia o comportamento de estruturas de concreto armado em relação ao avanço da frente de carbonatação, após cerca de quatro anos de exposição em uma região próxima ao mar na cidade de João Pessoa.

3. METODOLOGIA

3.1 Elaboração e exposição dos elementos em concreto

Para o estudo, foram utilizados pilares de concreto fabricados nas dimensões de 15 x 15 x 140 cm, com relações água/cimento 0,65, 0,57 e 0,50 e cimento comercial CPIIF, cuja composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do cimento empregado.

Tipo de cimento	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	RI	PF
CPIIF-32	3,21	18,11	4,13	2,27	59,87	3,81	0,21	1,51	1,45	5,50

Os elementos de concreto armado sofreram cura úmida de sete dias e, em seguida, foram expostos em ambiente de atmosfera marinha em pontos que estão a 10, 100, 200 e 500m em relação ao mar. Cabe aqui esclarecer que a exposição em zona de atmosfera marinha, além dos objetivos aqui tratados, teve, também, a intenção de avaliar a agressividade por cloreto (não tratada nessa publicação).

No mesmo ato de fabricação dos pilares, foram moldados três corpos-de-prova para cada pilar, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, para obtenção das medidas de grau de saturação (GS). Os mesmos sofreram iguais procedimentos de cura e foram expostos ao lado de cada pilar correspondente.

3.2 Medidas de carbonatação, grau de saturação e parâmetros climatológicos

Após 6, 10, 14, 18 e 46 meses de exposição, foram determinadas as profundidades médias de carbonatação de cada concreto. Para tal, em cada idade, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação em cilindros de concreto extraídos dos pilares. Estas medidas foram realizadas após a aplicação de solução de fenolftaleína a 1%, através de um paquímetro aferido, identificando-se a profundidade carbonatada em doze pontos distintos. De posse destes resultados, foram obtidos os valores médios da profundidade de carbonatação e os seus respectivos desvios.

O grau de saturação, que representa o percentual médio de água presente nos poros do concreto tendo como referência a sua capacidade máxima de absorção, foi monitorado durante todo o período da pesquisa. Este monitoramento foi realizado através da pesagem semanal dos corpos-de-prova expostos, seguindo procedimento descrito por GUIMARÃES (2000) e permitindo verificar o comportamento do GS em função das condições ambientais. Para cada condição, adotou-se a média dos resultados nos três corpos-de-prova empregados. Para a obtenção do valor do grau de saturação, teve-se como referência o índice de absorção total obtido de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987).

Como forma de qualificar o ambiente no qual os pilares foram expostos, monitorou-se, em cada estação, o comportamento da temperatura e da umidade relativa ao longo do período no qual o estudo se processou, empregando-se um termo-higrômetro digital.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Características ambientais

A temperatura apresentou pouca variabilidade entre as estações de monitoramento, com resultados médios situando-se, aproximadamente entre 25 e 30 °C ao longo do período estudado. Por outro lado, a umidade relativa apresentou um suave decréscimo com o afastamento da costa (Figura 2), que pode ser explicado pelo afastamento da fonte de umidade que é o mar.

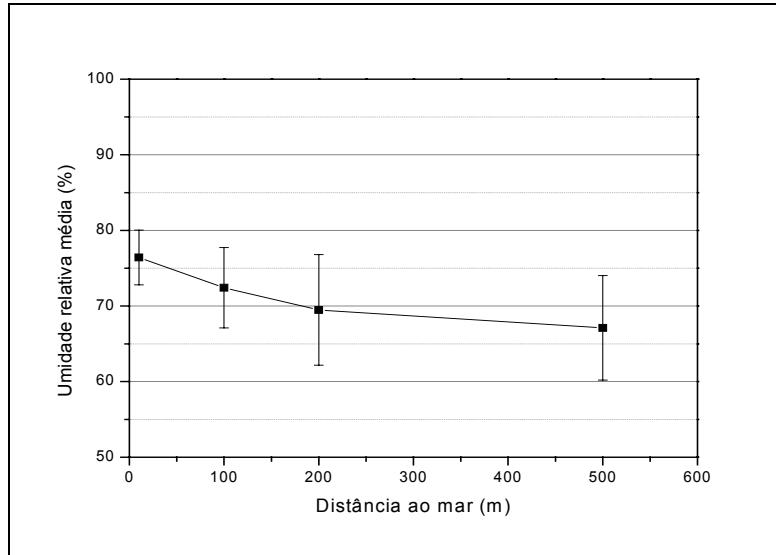


Figura 2 - Umidade relativa média obtida nos postos de monitoramento.

4.2 Grau de saturação

O primeiro aspecto a ser comentado é a redução dos níveis médios de saturação com o aumento da relação a/c (Figura 3). De forma complementar, as flutuações do GS nos concretos de maior relação a/c também foram mais intensas. Isto se justifica em função da porosidade do concreto. Os concretos de poros mais refinados dificultam a transferência de umidade, em função de mais choques entre as moléculas e contra as paredes dos poros (XI et al., 1994). Assim, estes concretos mantêm níveis de GS mais estáveis ao longo do tempo e mais elevados.

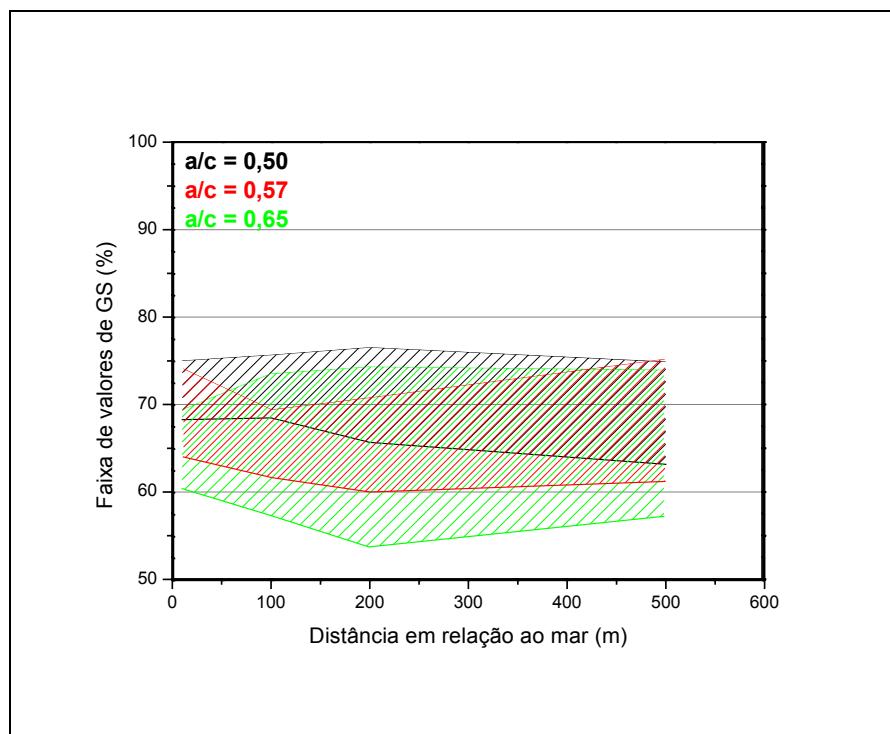
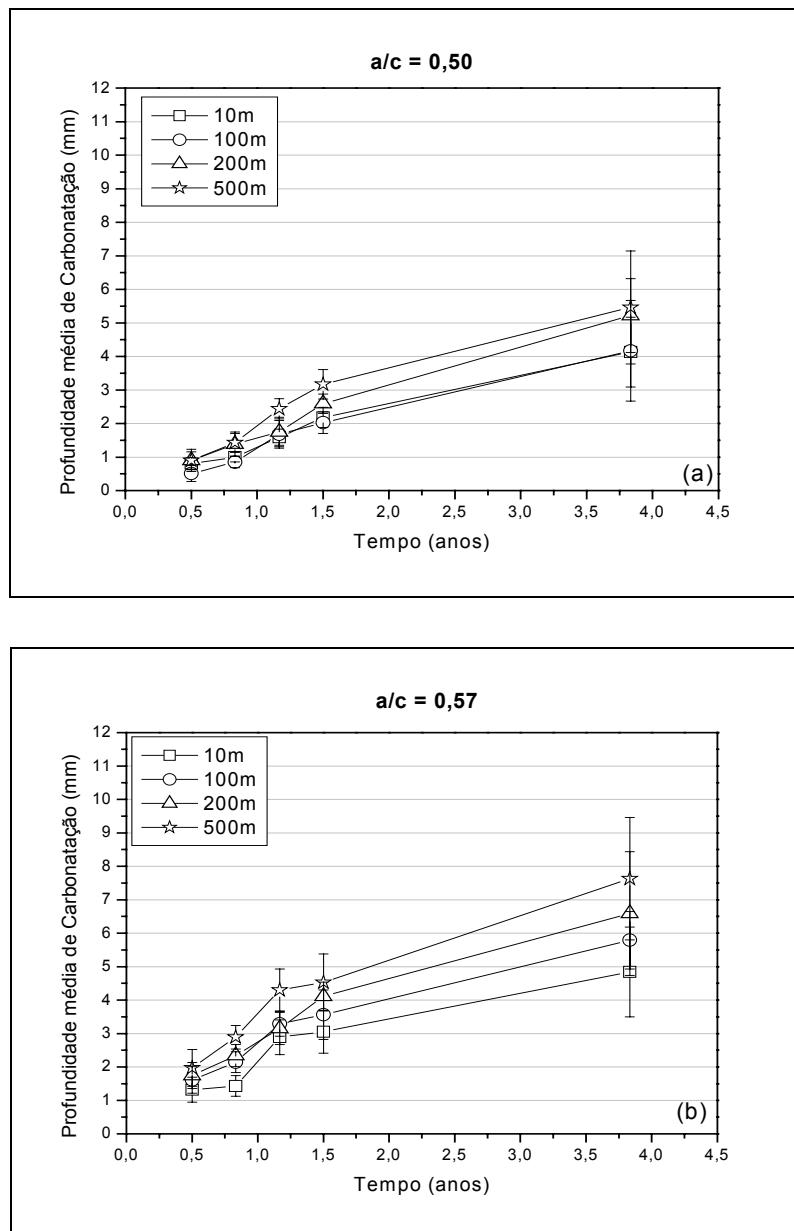


Figura 3 – Faixa de valores do Grau de saturação nos postos de monitoramento

Também pode-se observar, na Figura 3, que há um comportamento menos estável do GS com o afastamento da costa, concordando com o comportamento da umidade relativa (Figura 2). Isto se explica pelas trocas mais intensas de umidade com o meio em função do afastamento da fonte de umidade que é o mar. Por outro lado, a tendência de decréscimo com o afastamento do mar permanece.

4.3 Profundidade de carbonatação

Os concretos analisados apresentaram o clássico crescimento dos valores de carbonatação com o aumento da relação água/cimento, como consequência da sua maior porosidade. Através da Figura 4, também pode-se notar o aumento da carbonatação com o afastamento do mar, o que fica mais claro no último ciclo de medidas.



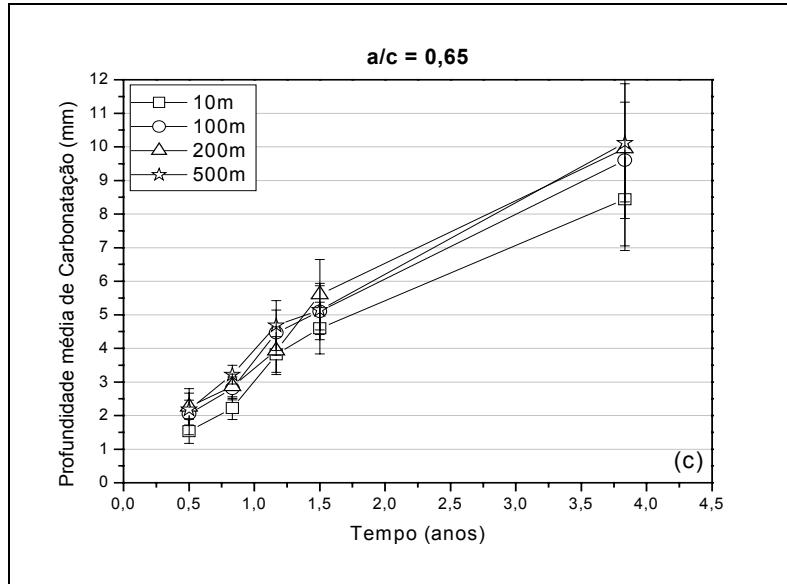


Figura 4 - Profundidade média de carbonatação a 10, 100, 200 e 500 m do mar: (a) a/c = 0,50; (b) a/c = 0,57 (c) a/c = 0,65

Conforme comentado no item 1, um modelo clássico que representa o comportamento da profundidade de carbonatação é o da raiz quadrada do tempo. Este modelo, já amplamente estudado, foi utilizado para obterem-se os resultados apresentados na Tabela 2, onde k_{carb} é uma constante que representa a velocidade média do avanço da frente de carbonatação, expressa em mm/ano^{1/2}.

Tabela 2 - Resultados dos ajustes do modelo $x_{carb} = k_{carb} \sqrt{t}$ aos dados de carbonatação obtidos.

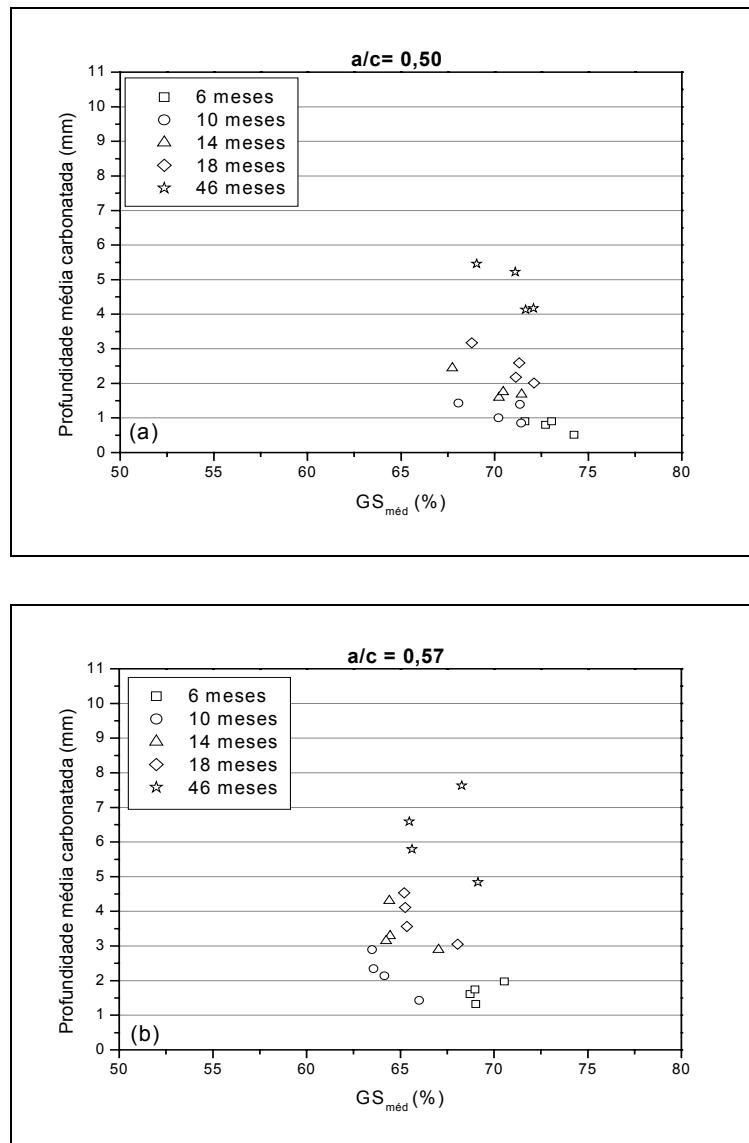
Relação a/c	Distância (m)	k_{carb} (mm/ano ^{1/2})	r^2
0,50	10	1,782	0,84
	100	1,737	0,80
	200	2,195	0,83
	500	2,446	0,85
0,57	10	2,372	0,90
	100	2,853	0,96
	200	3,155	0,94
	500	3,724	0,95
0,65	10	3,754	0,87
	100	4,328	0,90
	200	4,445	0,88
	500	4,552	0,90

Os resultados confirmam as observações feitas na Figura 4, indicando o aumento da frente de carbonatação com o distanciamento do mar e com o aumento da relação água/cimento. Como os níveis de saturação dos poros são elevados, uma menor presença de água nos poros de concreto favorece ao avanço da carbonatação. Quanto ao tipo de concreto, há uma tendência de crescimento mais rápido da profundidade de carbonatação para os concretos mais porosos, em virtude da maior facilidade de acesso de CO₂.

As menores taxas de avanço da carbonatação nas zonas próximas ao mar (10 e 100 m) e maiores nas zonas mais distantes (200 e 500 m do mar) correspondem a comportamento inverso em relação à atuação dos cloretos, a qual é mais significativa nas zonas mais próximas do mar (MEIRA et al., 2003) e se atenua com o distanciamento da costa. Ocorre, então, um efeito inverso, isto é, onde uma forma de ataque é mais forte, a outra torna-se mais branda e vice-versa.

4.4 Relação entre profundidade carbonatada e grau de saturação

Conforme comentado no item 1, a presença de água nos poros do concreto pode ser favorável ou não ao processo de carbonatação, dependendo dos níveis de saturação observados. Nos concretos estudados nesta pesquisa, os níveis de saturação dos poros estiveram, em sua maioria, sempre elevados. Desta forma, reduções do grau de saturação, a partir desse patamar, facilitam a entrada de CO_2 e o consequente avanço da carbonatação. A Figura 5 apresenta a relação entre a profundidade carbonatada e o grau de saturação médio ($\text{GS}_{\text{méd}}$) para as diversas idades e concretos.



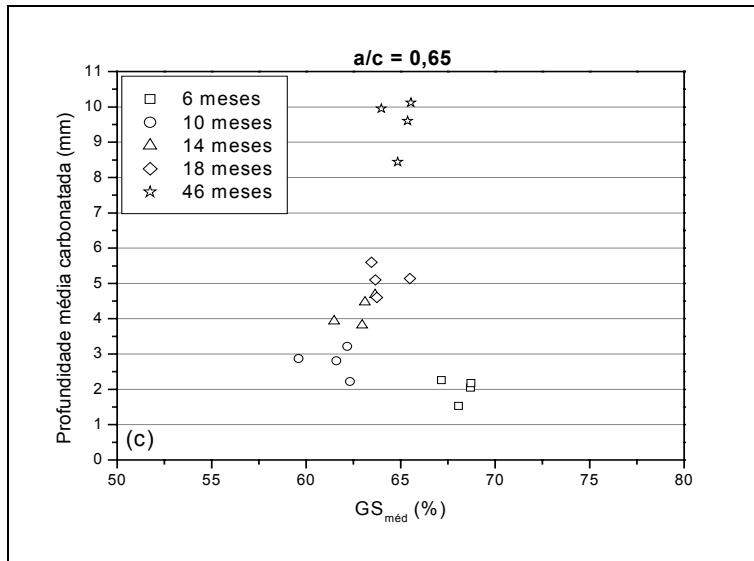


Figura 5 - Relação entre profundidade média de carbonatação e GS_{med} : (a) $a/c = 0,50$; (b) $a/c = 0,57$ (c) $a/c = 0,65$

A redução da profundidade carbonatada com o aumento do grau de saturação foi observada na grande maioria dos concretos e idades, concordando com as afirmações anteriormente colocadas. Nesse sentido, é importante ressaltar os níveis de saturação observados, sempre superiores a 50%.

Um outro aspecto a ser comentado é que a redução da profundidade de carbonatação com o aumento do grau de saturação foi mais acentuada para os níveis de saturação mais elevados. Para explicar este comportamento, é importante se reportar à Figura 1, que relaciona grau de carbonatação com umidade relativa ambiental, uma vez que não se dispõe, na literatura, de relação direta entre grau de carbonatação e grau de saturação. A umidade relativa, neste caso, representa uma medida indireta indicativa da quantidade de água nos poros do concreto. Neste sentido, há uma quantidade ótima de umidade, na qual processo caminha mais rápido e, saindo desta zona, há uma queda brusca na velocidade de carbonatação com a alteração na quantidade de água nos poros do concreto. No caso desta pesquisa, os resultados se situaram entre a parte central da curva e o seu tramo direito, onde a presença de água é mais elevada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de carbonatação é uma importante fonte de degradação das estruturas de concreto armado. Esse processo é um fenômeno que depende das características dos materiais e do ambiente, em um processo interativo simultâneo.

Dentre as características dos materiais, destaca-se a relação água/cimento, que tem relação direta com a porosidade do concreto. Quanto maior a porosidade do concreto, mais rápido é o avanço da frente carbonatada devido à facilidade da entrada de CO_2 , considerando os níveis de saturação observados nesta pesquisa.

Em relação ao ambiente em que a estrutura está inserida, o afastamento da costa reduz a umidade ambiental e a presença de água nos poros do concreto, aumentando a velocidade de carbonatação com o distanciamento do mar. Como são encontrados níveis altos de saturação (entre 50 e 80%), qualquer diminuição da quantidade de água nos poros favorece o avanço da carbonatação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: PINI, 1992. 104p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da absorção de água por imersão** – índice de vazios e massa específica (NBR 9778). Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- BAKKER, R. F. M. Initatio period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete.** New York, RILEM / Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.
- BENTUR, A.; DIAMOND, S. ; BERKE, N. S. **Steel corrosion in concrete – fundamentals and civil engineering practice.** London, E & FN SPON, 1997. 201p.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto arado em ambientes marinhos.** (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo, 2000. 241 p.
- HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p. 489-504, 1987.
- MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, M. C. Effect of distance from sea and chloride aggressiveness in concrete structures in Brazilian coastal site. **Materiales de Construcción**, v. 53, n. 271-272, p. 179-188, 2003.
- POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions.** Bruselas: CEBELCOR, 1974. 644p.
- TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Sweden: CBI, 1982. 468p.
- XI, Y.; BAZANT, Z. P.; MOLINA, L.; JENNINGS, H. M. Moisture diffusion in cementitious materials: moisture capacity and diffusivity. **Advanced Cement Based Materials.** v. 1, p. 258-266, 1994.