

## **UTILIZAÇÃO DE MODELO DE CARBONATAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DO FENÔMENO EM CONDIÇÕES ACELERADAS E COMPARAÇÃO COM DADOS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

**Cristiane Pauletti (1); Jean-Pierre Ollivier (2); Jérôme Verdier (2);  
Denise C. C. Dal Molin (1); Claudio de Souza Kazmierczak (3)**

(1) Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(2) Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – Institut National des Sciences Appliquées – Université Paul Sabatier – 135 Avenue de Rangueil, 31077 – Toulouse Cedex 4 – France

(3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – São Leopoldo – RS – Brasil

### **RESUMO**

A carbonatação é um fenômeno que propicia condições para a corrosão de armaduras, uma das manifestações patológicas que mais afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado. O presente trabalho apresenta simulações da carbonatação acelerada através do modelo matemático desenvolvido no Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse. Essas simulações tiveram como parâmetro de comparação, os dados de ensaios acelerados feitos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Os corpos-de-prova para estes ensaios foram feitos de argamassa, com cimento CPI e relações água/cimento de 0,40, 0,55 e 0,70. As amostras foram precondicionadas conforme os procedimentos da RILEM e carbonatadas com 6% e 100% de CO<sub>2</sub>. As simulações no modelo de carbonatação chegaram a um bom ajuste entre os pontos experimentais e o modelo para as relações a/c de 0,40 e 0,55 e percentual de CO<sub>2</sub> de 6%. Para 100% de CO<sub>2</sub>, o fenômeno precisa ser mais bem compreendido e o modelo ajustado.

Palavras-chave: durabilidade, carbonatação, ensaio acelerado, concentração de CO<sub>2</sub>, modelagem.

### **ABSTRACT**

Carbonation phenomena are intimately connected with the corrosion of steel frames, one of the main pathological manifestations affecting reinforced concrete structures. This study presents simulations of accelerated carbonation using mathematical models developed at LMDC in Toulouse. These simulations were compared with experimental data from accelerated tests performed at two major Brazilian universities - UFRGS and UNISINOS. The test specimens for these tests were prepared with mortar from CPI cement and w/c ratios 0.40, 0.55 and 0.70. The samples were conditioned in accordance with the RILEM guidelines and underwent carbonation with 6% and 100% CO<sub>2</sub>. The simulations in the carbonation model show a good fit between experimental data and the mathematical model for w/c = 0.40 and 0.50 and CO<sub>2</sub> = 6%. However, further studies are required to better understand this phenomenon and adjust the model when 100% CO<sub>2</sub> is used.

Keywords: durability, carbonation, accelerated test, CO<sub>2</sub> concentration, modeling

## 1 INTRODUÇÃO

A carbonatação do concreto por si só não representa um problema para as estruturas, no entanto, pelo fato de dar condições à corrosão das armaduras, merece atenção. O fenômeno da carbonatação vem sendo estudado desde os anos 60, mas ainda existem lacunas de conhecimento para a sua completa compreensão.

Nas concentrações de CO<sub>2</sub> naturais, vários anos podem ser necessários para obtenção de perfis de profundidade de carbonatação significativos. Em função disso são empregados ensaios acelerados, com concentrações de CO<sub>2</sub> que variam de 1 a 100% e também são criados modelos de previsão da profundidade carbonatada.

Os primeiros modelos de previsão de carbonatação foram publicados em 1969 por Smolczyk (1969), Hamada (1969) e Meyer (1969). Mais tarde, com base em ensaios acelerados e focando a difusibilidade do CO<sub>2</sub> no concreto, Padadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991a, 1991b, 1992) apresentam avanços na modelagem do fenômeno. Em 2004, destacam-se os modelos criados por Saetta e Vitaliani (2004), Thiéry *et al.* (2004) e o de Bary e Sellier (2004), que depois foi aperfeiçoado por Duprat, Sellier e Nguyen (2006).

O presente trabalho visa contribuir para o aperfeiçoamento e validação do modelo de carbonatação de Duprat, Sellier e Nguyen (2006) desenvolvido no Laboratoire Matériaux et Durabilité de Constructions (LMDC), Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse e entendimento do fenômeno através do mesmo. As primeiras simulações do comportamento do modelo são comparadas aos resultados experimentais gerados em pesquisas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

A seguir são apresentados, brevemente, os dados da pesquisa experimental e o modelo de carbonatação.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios de carbonatação acelerada foram feitos com prismas de argamassas de 4x4x16 cm. O cimento utilizado foi o CPI (equivalente ao cimento tipo I da ASTM C150) e as relações a/c foram de 0,40, 0,55 e 0,70. As misturas foram feitas fixando a proporção entre água e materiais secos em 13,5%. As amostras foram curadas em água saturada de cal, por um período de 28 dias e depois submetidas ao precondicionamento recomendado pela RILEM TC 116-PCD (1999), porém com umidade relativa de equilíbrio de 70%, ao invés dos 75% descritos no procedimento. Os ensaios foram feitos com temperatura de 20±1°C, umidade relativa de 70±5% e percentuais de CO<sub>2</sub> de 6% e 100%. As medidas de profundidade de carbonatação foram obtidas entre 7 dias e cerca de 170 dias. Mais informações sobre o programa experimental podem ser obtidas em Pauletti (2004).

### 2.1 Modelo de Carbonatação

Para modelar a carbonatação é necessário considerar simultaneamente o transporte e consumo de CO<sub>2</sub>, transporte e produção de umidade (DUPRAT; SELLIER; NGUYEN, 2006). O modelo proposto por Duprat, Sellier e Nguyen (2006) está baseado na solução de duas equações diferenciais de difusão não-lineares acopladas, que geram esses transportes. A eq. 1 gera o transporte de dióxido de carbono.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varphi (1 - S_r) \frac{M_c}{RT} p_c \right) + \operatorname{div} \left( f_D D_c \frac{M_c}{RT} \operatorname{grad}(p_c) \right) - Q_c = 0 \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:  $\varphi$  = porosidade do concreto;  $S_r$  = grau de saturação do concreto;  $p_c$  = pressão parcial do CO<sub>2</sub> na fase gasosa;  $D_c$  = coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no ar;  $M_c$  = massa molar do CO<sub>2</sub>;  $R$  = constante de gases perfeitos;  $T$  = temperatura (suposta constante e igual a 293 K);  $Q_c$  = termo que descreve a taxa molar de variação da concentração de cálcio;  $f_D$  = fator que traduz o efeito global da porosidade e do grau de saturação do concreto sobre o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>.

A eq. 1, de conservação de dióxido de carbono, leva em conta o consumo de CO<sub>2</sub> à medida que este

penetra no material. O modelo aceita que o C-S-H possa carbonatar somente quando toda a portlandita foi consumida (CHAUSSADENT *et al.*, 2000) e tem em conta a taxa de saturação sobre a dissolução do CO<sub>2</sub> na solução intersticial e em consequência, sobre a velocidade de descalcificação dos produtos hidratados. No modelo é considerada a taxa de avanço de dissolução de portlandita avaliada por Thiéry *et al.* (2004) que utilizam a hipótese de formação de uma camada esférica de calcita em torno do hidrato reativo. Esta hipótese também considera a diminuição da porosidade com o desenvolvimento da carbonatação. A eq. 2 gera o transporte de água.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi S_r \rho_w) + \operatorname{div} \left( \frac{f_K K \rho_w}{\nu_w} \frac{RT}{M_w} \frac{1}{h(S_r)} \frac{dh(S_r)}{dS_r} \operatorname{grad}(S_r) \right) - Q_w = 0 \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:  $\rho_w$  = massa específica da água;  $\nu_w$  = viscosidade cinemática da água;  $K$  = permeabilidade intrínseca do material;  $f_K$  = fator que traduz a influência do grau de saturação sobre a permeabilidade à água;  $M_w$  = massa molar da água;  $h(S_r)$  = expressão da umidade relativa em função da taxa de saturação;  $Q_w$  = termo diretamente proporcional à velocidade de descalcificação da portlandita.

Na eq. 2, de conservação da massa de água, são aplicadas sucessivamente as leis de Darcy, para exprimir o fluxo de água líquida a partir da pressão capilar, e depois a de Kelvin, para exprimir essa última em função da quantidade de água. Os autores do modelo explicam que nos fenômenos onde a umidade relativa no material varia, como no caso da carbonatação, é necessário recorrer na modelagem a uma isoterma de sorção-dessorção do material.

Conforme Duprat, Sellier e Nguyen (2006), as equações a serem resolvidas constituem um sistema de equações diferenciais não-lineares acopladas. Elas foram alteradas de forma a tomar a fórmula clássica da equação de calor. A resolução se apóia sobre a formulação térmica de Galerkine para a discretização no espaço e o método de Euler explícito para a discretização no tempo.

A porosidade e a concentração molar de portlandita e dos géis de C-S-H são recalculados após cada final de passo de tempo, para utilização no passo de tempo posterior. O modelo é processado no software Castem e como saída tem-se: a profundidade de carbonatação em função do tempo, os perfis de consumo de portlandita e C-S-H, evolução da porosidade e do grau de saturação. Mais detalhes do desdobramento do modelo e das equações envolvidas são apresentados por Bary e Sellier (2004) e Duprat, Sellier e Nguyen (2006).

Para simulação de um ensaio de carbonatação é necessário fornecer ao modelo as seguintes variáveis de entrada:

- **isoterma de sorção-dessorção:** relação de equilíbrio entre o grau de saturação (Sr) do material e a umidade relativa (HR) do ambiente, do material a ser simulado. O modelo foi desenvolvido com os dados de Thiéry *et al.* (2004) e no presente trabalho foram utilizados os resultados de Baroghel-Bouny (1994), que ensaiou materiais com características similares às desta pesquisa.

- **coeficiente de difusão intrínseco do CO<sub>2</sub> (D<sub>c</sub>), em m<sup>2</sup>/s:** coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no material a ser analisado. Segundo Houst (1993), a difusão do O<sub>2</sub> no ar, à 0°C, é de 1,78.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s e no concreto, a literatura indica valores da ordem de 1.10<sup>-7</sup> a 1.10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s. O autor calculou que para um concreto com porosidade entre 10 e 25%, o coeficiente efetivo de difusão seria de 1,8.10<sup>-4</sup> e 4.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s, mas esses valores estão muito distantes dos valores indicados na literatura. Houst (1993) mediou os coeficientes de difusão de pastas e argamassas, sendo que para as argamassas os valores estão na ordem de 2.10<sup>-7</sup> à 5.10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s. As simulações foram iniciadas com coeficientes da ordem de 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s, para argamassas de CPI e relação a/c 0,55, carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub>;

- **permeabilidade intrínseca do material no estado sólido (K), em m<sup>2</sup>:** expressa em função da porosidade a partir de Van Genuchten<sup>1</sup> apud Thiéry *et al.* (2004) e Bary e Sellier (2004). Foi adotado valor de 1.10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup>, conforme indicado na literatura (BAROGHEL-BOUNY, 1994), para um material com características semelhantes;

- **porosidade acessível à água (po):** deve ser medida para os materiais a serem estudados. No caso do

<sup>1</sup> M. T. Van Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Scientific Society Am Proceedings, **44** (1980): pp. 892-898.

presente trabalho, esse valor foi calculado a partir da quantidade de água total evaporável dividida pelo volume dos corpos-de-prova. Como a quantidade de água sobre materiais secos foi a mesma para todas as misturas, esse valor foi aproximadamente igual a 20% para todas as argamassas;

- **teor inicial de  $\text{Ca(OH)}_2$  ( $\text{Ca(OH)}_2i$ ), em mol/m<sup>3</sup>:** é calculado a partir da composição do material e do cimento em estudo. Leva em consideração a fração molar dos constituintes nas reações de hidratação das diferentes fases do clínquer. A descrição química dos produtos hidratados é apresentada por Bary e Sellier (2004);

- **raio das esferas de portlandita (ro), em m:** tamanho médio dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  antes da carbonatação. Chaussadent *et al.* (2000) encontraram valores que variam de 30 à 60  $\mu\text{m}$  para pastas de cimento com relação a/c respectivamente iguais a 0,45 e 0,60. Nas simulações aqui apresentadas foram utilizados valores interpolados a partir da referida bibliografia;

- **parâmetro m (m), adimensional:** coeficiente escalar no cálculo da permeabilidade relativa apresentada por Van Genuchten<sup>1</sup> *apud* Bary e Sellier (2004) e Duprat, Sellier e Nguyen (2006), cujo valor adotado foi igual a 0,45;

- **parâmetros “a” (fa) e “b” (fb), adimensionais:** coeficientes escalares em função da porosidade (po) e do grau de saturação (Sr), adaptados de Millington<sup>2</sup> *apud* Bary e Sellier (2004) e Duprat, Sellier e Nguyen (2006). Os valores adotados são os propostos por Thiéry *et al.* (2004) e, respectivamente, correspondem a 2,74 e 4,2;

- **grau de saturação inicial (Sr0), adimensional:** estado de saturação das amostras antes do início dos ensaios. Estes valores foram calculados a partir dos dados experimentais, dividindo a quantidade de água em equilíbrio a 70% de umidade pelo total de água no estado saturado;

- **pressão inicial de  $\text{CO}_2$  (pc0), em Pa:** valor da pressão no corpo-de-prova, o qual foi adotado conforme indicado na literatura (BARY; SELLIER, 2004), igual a  $1.10^{10}$  Pa;

- **teor inicial de C-S-H (CSHi), em mol/m<sup>3</sup>:** assim como o teor inicial de  $\text{Ca(OH)}_2$ , é calculado a partir da composição do material e do cimento empregados (BARY; SELLIER, 2004);

- **grau de saturação atmosférica (Sr\_atm), adimensional:** corresponde à saturação do ar na superfície do corpo-de-prova e é considerado igual ao grau de saturação inicial das amostras;

- **pressão inicial do  $\text{CO}_2$  no ar (pc\_atm), em Pa:** diz respeito à concentração de  $\text{CO}_2$  no experimento. No caso foram empregados valores de 6000 Pa e de 100000 Pa para as concentrações de 6 % e 100 % de  $\text{CO}_2$ , respectivamente;

- **tempo de carbonatação (t\_car), em dias:** duração do experimento, da exposição ao ambiente agressivo. Este tempo varia conforme a composição do material e condições do ensaio, e neste caso ficou entre 40 e 170 dias.

De acordo com Duprat, Sellier e Nguyen (2006), a profundidade de carbonatação é determinada pela taxa de carbonatação da portlandita correspondente ao ponto de viragem da fenolftaleína ao passar para um valor de pH inferior a 9. Em função disso, o modelo considera que a amostra foi carbonatada quando o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  é igual a 50%, porém, permite simulações com diferentes valores deste “consumo.”

Grandet<sup>3</sup> (1975) *apud* Houst (1993) coloca que somente o C-S-H e a etingita podem se carbonatar totalmente e que a carbonatação da portladita ficará limitada a 50 ou 60%. Ele explica que esse limite se justifica pelo tamanho dos cristais, sobre os quais o cálcio adere perfeitamente para formar uma camada impermeável ao  $\text{CO}_2$  e que uma moagem posterior desses cristais parcialmente carbonatados permitiria a continuação da reação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram simulados os resultados das argamassas feitas com o cimento CPI, nas relações a/c

<sup>2</sup> R. J. Millington, “Gas diffusion in porous media”, *Science*, **130** (1959): pp. 100-102.

<sup>3</sup> J. Grandet, “Contribution à l’étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux”. Université Paul Sabatier, Toulouse, Tese nº 671, 1975.

0,40 e 0,55, carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub>. Os dados relativos às isotermas de sorção e dessorção foram sempre os mesmos e são apresentados na tabela 1. Os demais dados de entrada, para as duas primeiras simulações, são apresentados na tabela 2.

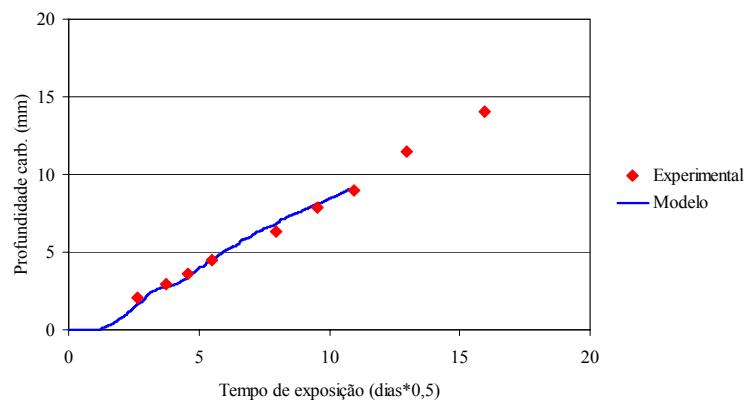
**Tabela 1** - Isoterma de sorção e dessorção de concretos a partir de Baroghel-Bouny (1994)

<b>Sr</b>	0,00	0,12	0,25	0,30	0,43	0,62	0,80	0,90	1,00
<b>HR</b>	0,00	0,05	0,25	0,37	0,50	0,62	0,75	0,87	1,00

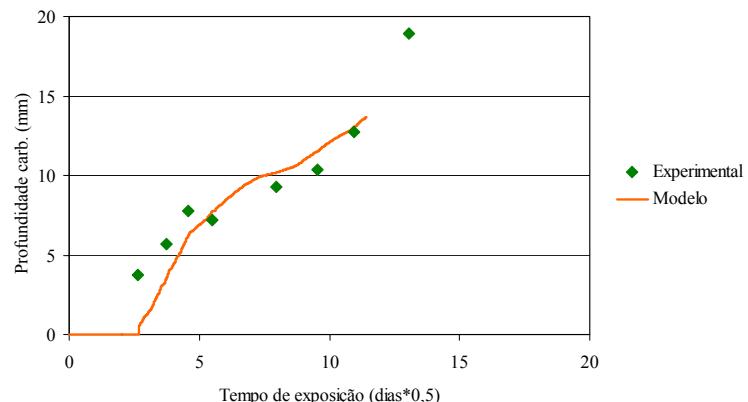
**Tabela 2** - Dados de entrada no modelo de carbonatação para CPI, a/c 0,40 e 0,55 e 6% de CO<sub>2</sub>

<b>Parâmetro</b>	<b>CPI 0,40</b>	<b>CPI 0,55</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>CPI 0,40</b>	<b>CPI 0,55</b>
Dc =	6,50E-06	9,00E-06	fb =	4,2	4,2
K =	1,00E-20	1,00E-20	Sr0 =	0,4451	0,3442
po =	0,1990	0,1957	pc0 =	1,00E-10	1,00E-10
Ca(OH) <sub>2</sub> i =	6187	5068	CSHi =	2614	1731
ro =	2,50E-05	5,00E-05	Sr_atm =	0,4451	0,3442
m =	0,45	0,45	pc_atm =	6000	6000
fa =	2,74	2,74	t_car =	170	70

Os dados obtidos pelo modelo foram comparados aos dados medidos experimentalmente. As figuras 1 e 2 ilustram o ajuste do modelo matemático (DUPRAT; SELLIER; NGUYEN, 2006) aos pontos experimentais.



**Figura 1** - Profundidade de carbonatação para o CPI, a/c 0,40 e 6% de CO<sub>2</sub>

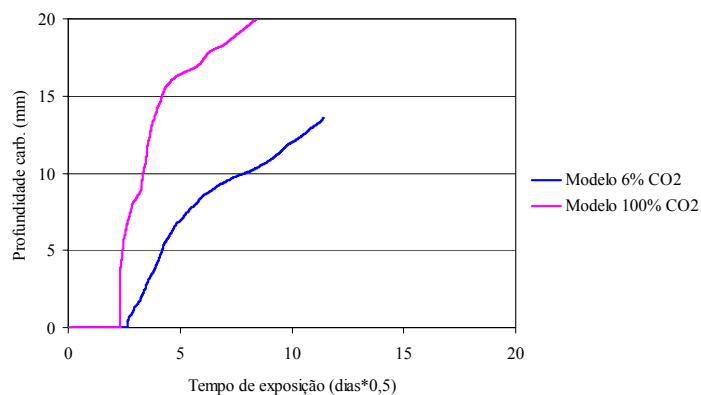


**Figura 2** - Profundidade de carbonatação para o CPI, a/c 0,55 e 6% de CO<sub>2</sub>

As curvas das figuras 1 e 2 mostram que o modelo ficou bem ajustado aos pontos experimentais de profundidade de carbonatação. Isso indica que o modelo representa bem a realidade e neste caso pode ser utilizado para predizer a profundidade de carbonatação.

Em seguida tentou-se o ajuste para a relação a/c 0,70, mas até o momento ainda não foi possível uma boa correlação entre o modelo e os resultados experimentais. Dados de entrada como o tamanho dos cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , as isotermas e o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  estão sendo melhor investigados.

Para o percentual de 100% de  $\text{CO}_2$ , verificou-se que o modelo trabalha com a premissa que quando se aumenta este percentual, a profundidade de carbonatação também é mais significativa, como ilustra a figura 3, onde a única diferença nos dados de entrada é a concentração de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 3** - Resultados de simulação alterando somente o percentual de  $\text{CO}_2$

Os resultados da figura 3 estão em desacordo com os dados experimentais da tabela 3, que apresenta a profundidade de carbonatação média para as relações a/c 0,40 e 0,55 quando as amostras são carbonatadas com 6% e 100% de  $\text{CO}_2$ .

Pesquisas da Association Française pour la Construction e Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions (AFPC-AFREM, 1997) mostram que a profundidade de carbonatação é maior quando se aumenta a concentração de  $\text{CO}_2$ , no entanto, para percentuais de  $\text{CO}_2$  acima de 50% há uma mudança no comportamento e os resultados passam a depender do tipo de precondicionamento adotado. Mesmo assim, a profundidade de carbonatação à 100% de  $\text{CO}_2$  foi inferior para os dois tipos de precondicionamento utilizados (AFPC-AFREM, 1997).

**Tabela 3** - Profundidade de carbonatação média (mm)

Tempo carb. (dias)	CPI 0,40 6% CO <sub>2</sub>	CPI 0,40 100% CO <sub>2</sub>	CPI 0,55 6% CO <sub>2</sub>	CPI 0,55 100% CO <sub>2</sub>
7	2,05	0,00	3,72	0,00
14	2,95	0,00	5,66	2,36
21	3,60	0,00	7,77	2,84
30	4,48	2,18	7,22	4,37
63	6,34	2,94	9,30	5,10
91	7,84	4,14	10,36	9,14
120	8,96	5,04	12,75	7,81
168	11,47	9,36	18,90	12,68

Os dados da tabela 3 mostram que até a idade medida, a carbonatação a 100% de  $\text{CO}_2$  é inferior àquela obtida a 6%. Os resultados encontrados por Abreu (2004) e a pela AFPC-AFREM (1997) corroboram esse comportamento. Estudos estão sendo feitos para melhor o entendimento do modelo e do fenômeno de carbonatação em elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$  (100%) e serão publicados posteriormente.

## 4 CONCLUSÕES

As primeiras simulações no modelo de carbonatação desenvolvido no LMDC de Toulouse mostraram um bom ajuste com os dados de carbonatação acelerada de argamassas de CPI e relação a/c 0,40 e 0,55, ensaiadas com 6% de CO<sub>2</sub>.

Parâmetros de entrada do modelo, como as isotermas de sorção e dessorção, o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> e o tamanho dos cristais de Ca(OH)<sub>2</sub>, que exercem forte influência nos resultados do modelo, necessitam de melhor aproximação ao material em estudo na presente pesquisa.

A carbonatação a 100% de CO<sub>2</sub> apresenta um comportamento distinto daquela desenvolvida em percentuais menores (abaixo de 50%) e carece ser mais bem investigada.

O modelo de carbonatação tem a pretensão de simular os dados encontrados na prática. As equações que regem o modelo em estudo já são consagradas e os resultados apresentados com 6% de CO<sub>2</sub> mostram que ele representa a realidade. Tendo isso em vista, pode-se dizer que o modelo é válido para predição dos resultados, no entanto, quando os ensaios são realizados com altas concentrações de CO<sub>2</sub>, como 100%, o comportamento não segue as leis físicas normais que regem o modelo. Em função disso os dados de ensaios gerados com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> (acima de 50%) devem ser tomados com cuidado, pois parecem distorcer o fenômeno.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- AFPC-AFREM. ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LA CONSTRUCTION (AFPC)-ASSOCIATION FRANÇAISE DE RECHERCHES ET D'ESSAIS SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (AFREM). Essai de carbonatation accélérée – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, **Compte-rendu des journées techniques de l'AFPC-AFREM**, Durabilité des Bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, AFPC-AFREM, 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, p. 153-158.
- BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances**. Tese de doutorado da Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- BARY, B.; SELLIER, A. Coupled moisture–carbon dioxide–calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1859-1872, 2004.
- CHAUSSADENT, T. *et al.* Effect of water-cement ratio of cement pastes on microstructural characteristics related to carbonation process. 5<sup>th</sup> CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, 2000, Barcelone. **Proceedings...** Barcelone, p. 523-537, 2000.
- DUPRAT, F.; SELLIER, A.; NGUYEN, X. S. Incidence de l'incertitude sur l'état hydrique du béton dans la carbonatation: approche probabiliste. In: TRANSFERT 2006 – Propriétés de Transferts des Géomatériaux, Lille, 1° et 2 de février 2006. **Actes du Colloque National...** Lille, France, 2006, CD-Room, Thème 3, ref. 51.
- HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo. v. III, part III, p. 343-369, 1969.

HOUST, Y. F. **Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie**. Tese de doutorado da Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1993.

MEYER, A. Investigations on the carbonation of concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5<sup>th</sup>, Tokyo, 1968. **Proceedings...** Tokyo, 1969. v. III, p. 394-401. (Supplementary Paper III – 52).

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1639-1650, Oct. 1989.

\_\_\_\_\_. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, [s.ed.], 1990, Brighton. **Proceedings...** London, BRE, 1991a. p. 27-38.

\_\_\_\_\_. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p. 363-373, Jul./Aug. 1991b.

\_\_\_\_\_. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**, n. 89, p. 119-130, Mar./Apr. 1992.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. TC 116-PCD: permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, Apr. 1999.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 571-579, 2004.

SMOCZYK, H. G. Discussion of principal paper of carbonation of concrete by Hamada. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1969. v. III, part III, p. 369-384.

THIERY, M. *et al.* Modeling of the atmospheric carbonatation of cementitious materials. **Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, 252-253, Ref. 4535, p. 153-187, 2004.

## 6 AGRADECIMENTOS

Com o apoio do Programa Alßan, Programa de bolsas de alto nível da União Européia para a América Latina, bolsa n° [E06D101135BR].