



## **Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada a partir de um programa interlaboratorial**

*Evaluation of reproducibility of the accelerated carbonation testing from an interlaboratory program*

Fernanda Giannotti da Silva Ferreira<sup>(1)</sup>; Paulo Roberto do Lago Helene<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos*

<sup>(2)</sup> *Consultor, PhD Engenharia*

*Rod. Washington Luis, km 235 - São Carlos - SP - CEP:13565-905*

### **Resumo**

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado é um tema atual e de grande importância, visto que grande parte das obras civis apresenta deteriorações precoces, comprometendo o seu uso seguro e funcional, além de grandes prejuízos à sociedade. No país, infelizmente não há métodos padronizados para os ensaios de durabilidade nem procedimentos consensuais que possam dar suporte à pesquisa. Assim, nesta pesquisa buscou-se analisar a reprodutibilidade dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada, utilizando uma das ferramentas mais empregadas na avaliação de métodos de ensaio, que é o programa interlaboratorial. Acredita-se que os resultados são de muita valia ao meio técnico e poderão ser utilizados na redação de textos normativos destinados aos ensaios de durabilidade de concretos expostos a meios ambientes agressivos.

*Palavra-Chave: concreto, carbonatação, programa interlaboratorial.*

### **Abstract**

The durability and service life of reinforced concrete structures is a current topic of great importance, since most of the civil works presents early deterioration, jeopardizing its safe and functional use, and great damage to society. In the country, unfortunately there is no standard for durability testing or consensual procedures that can support research methods. Thus, in this study we sought to examine the reproducibility of the test results of accelerated carbonation, using one of the most used tools in the evaluation of test methods, which is the interlaboratory program. It is believed that the results are of great value and may be used in drafting legal texts aimed at testing the concrete durability exposed to aggressive environments.

*Keywords: concrete, carbonation, interlaboratory program.*



## 1 Introdução

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto vêm sendo amplamente discutidas pela comunidade técnico-científica internacional, especialmente nos últimos 20 anos, buscando melhores caminhos para a especificação e o projeto de obras novas, assim como a execução de reparos, reforços e reconstruções de um grande número de obras com problemas patológicos precoces.

Um dos principais problemas patológicos é a corrosão das armaduras, sendo considerada por muitos pesquisadores como o mais grave e frequente problema em estruturas de concreto armado, que além de se constituir em um problema técnico-econômico, ainda representa um grande desperdício de recursos naturais e um problema de caráter local e mundial.

As estimativas do custo anual da corrosão nos Estados Unidos são da ordem de bilhões de dólares e a corrosão em pontes é o maior problema. O colapso do tabuleiro da Silver Bridge in Ohio River custou 40 vidas e 500 milhões de dólares (Fontana, 1986). De acordo com Long (1993), na Inglaterra, estudos realizados em 1990 apontam para um gasto anual de aproximadamente 36 bilhões de dólares em reparos e manutenção de estruturas de concreto. Ueda & Takewaka (2007) apresentam os gastos para realização de novas estruturas e gastos com reparo e manutenção de estruturas em diversos países e verifica-se que, em alguns países, como Alemanha e França, os gastos com manutenção são praticamente os mesmos valores empregados na construção de novas estruturas.

Nacionalmente a incidência dos casos de corrosão das armaduras, no contexto dos problemas estruturais, é bastante significativa. Em algumas regiões brasileiras, a corrosão de armaduras chega a atingir 64% dos principais problemas patológicos encontrados nas construções (Andrade, 2001) e o reparo e a reabilitação das estruturas deterioradas, em alguns casos, pode ter custo superior ao de uma estrutura nova.

Assim, o número de pesquisas realizadas, as quais envolvem as ações dos agentes agressivos no concreto armado é bastante vasto, entretanto, ainda há muito a ser estudado, a fim de obter condições de predição e medidas preventivas que sejam satisfatórias. No Brasil, não existem normas que regulamentam esses ensaios, cada pesquisador adota um método específico para seus experimentos, dificultando uma comparação fidedigna dos resultados obtidos em diferentes pesquisas. Daí a necessidade de estudos que reúnam esses conhecimentos e proponham a unificação dos métodos de ensaio. Um desses ensaios é o de carbonatação acelerada, analisado neste trabalho.

A importância do tema é claramente visualizada na observação de um significativo aumento nos últimos anos de congressos, comitês técnicos e reuniões especializadas no assunto durabilidade das estruturas e, principalmente, no consenso entre os pesquisadores de que deve haver uma padronização dos ensaios de durabilidade de concretos.



Assim, o objetivo principal deste trabalho é responder alguns questionamentos: os métodos de ensaio propostos são reprodutíveis? Qual a variabilidade dos resultados quando se utiliza esse método específico de ensaio? Para tanto, propôs-se um método de ensaio para realização da carbonatação acelerada, baseado nos procedimentos propostos pela RILEM (TC 116-PCD de 1999 e CPC-18 de 1988) e, por meio de um programa interlaboratorial, foi analisada a reprodutibilidade dos resultados obtidos entre os diversos grupos de pesquisa da área.

## 2 Programa interlaboratorial

De acordo com o Comitê de Materiais de Referência (*ISO REMCO – Reference Materials Committee*), da Organização Internacional para Padronização e Normas, Programa Interlaboratorial é definido como uma série de medições de uma ou mais propriedades, realizadas independentemente, por um grupo de laboratórios, em amostras de um material. É um programa abrangente, de muitas finalidades, dentre elas:

- Compatibilização entre resultados obtidos por dois laboratórios;
- Compatibilização entre resultados obtidos por vários laboratórios;
- Avaliação de Métodos de Ensaio;
- Certificação de Materiais de Referência e
- Avaliação de Desempenho de Laboratórios.

O planejamento, organização, operacionalização e a interpretação de resultados de um programa interlaboratorial dependem principalmente da finalidade a que o programa interlaboratorial se destina, sendo os objetivos desta pesquisa a avaliação de um método de ensaio e a compatibilidade de resultados.

Para que esse programa seja implantado e executado, devem ser considerados os seguintes aspectos: extensão (compreende a determinação do número de laboratórios, número de amostras e quantidade de repetições de ensaios), amostras (preparo, transporte e armazenagem), métodos de ensaio e resultados.

Embora todas as etapas sejam importantes e devam ser minuciosamente estudadas no desenvolvimento de um programa interlaboratorial, enfatiza-se a análise dos resultados obtidos, que requer o emprego de várias técnicas e permite estabelecer um resultado final. Destaca-se que o planejamento, o qual inclui as etapas de organização, operacionalização e a interpretação de resultados, depende principalmente do objetivo do Programa Interlaboratorial, sendo fundamental o conhecimento da natureza dos materiais que constituem as amostras, o modo apropriado de preparação das mesmas e instruções de método de ensaio bastante claras.

### 2.1 Métodos estatísticos para programa interlaboratorial

Várias são as técnicas estatísticas empregadas na avaliação dos resultados obtidos em um programa interlaboratorial, podendo ser divididas em duas categorias distintas:



- **Estatística paramétrica:** a média (aritmética) é utilizada como estimativa da posição central e o desvio padrão como uma estimativa da dispersão. O uso das técnicas desta categoria requer uma distribuição normal (Gaussiana) dos resultados obtidos e, caso este requisito não seja satisfeito, a média e o desvio padrão não têm credibilidade como boas estimativas dos parâmetros representativos dos resultados e
- **Estatística não-paramétrica ou robusta:** é válida inclusive para resultados de ensaios que não apresentam comportamento segundo uma distribuição normal. A estimativa da posição central é a mediana, em contrapartida da média, e alguns dos estimadores não-paramétricos do desvio padrão são: o desvio absoluto da mediana, desvio padrão robusto ou intervalo interquartilício.

Dentre as técnicas de estatística paramétrica e não-paramétrica, pode-se citar: método de Youden ou elipse da confiança, técnica do z-score, índices de repetitividade e reprodutibilidade, técnica da análise das variâncias, testes de Cochran e Grubbs, entre outros. Destaca-se que o número de amostras e o número de participantes também limitam o uso das técnicas de estatística, bem como o material e a propriedade a ser avaliada, especialmente no caso da avaliação de um método de ensaio, objetivo de estudo deste trabalho. A técnica utilizada neste trabalho foi o teste de Cochran, descrito a seguir.

### 2.1.1 Testes de Cochran e Grubbs

Os testes de Cochran e Grubbs são testes estatísticos geralmente utilizados para análise de resultados dispersos, antes de se proceder à interpretação de resultados populacionais de distribuição normal.

O teste de Cochran é aplicado quando se deseja comparar variâncias, ou seja, verificar se a variância dos resultados obtidos por um laboratório é diferente da variância dos demais laboratórios, verificando somente valores altos. Obtém-se o valor para o coeficiente de Cochran, relacionando-se a maior variância com o valor resultante da soma das variâncias. Através da comparação do valor calculado com valores de tabela em nível de confiança pré-estabelecido, toma-se a decisão se o valor é aceito ou rejeitado como disperso.

O teste de Grubbs verifica se as médias obtidas pelos vários laboratórios são compatíveis, após efetuado o teste de Cochran. A diferença entre o valor julgado suspeito e o valor da média dos laboratórios é relacionado com o desvio padrão do mesmo conjunto de laboratórios. O valor resultante é comparado com valores tabelados (ISO 5752:Parte2, 1994).

Destaca-se que cada técnica estatística a ser empregada depende da finalidade do Programa Interlaboratorial e em qualquer dos objetivos estão envolvidos os materiais a serem analisados (amostras), pessoal (técnicos, operadores ou analistas) e procedimentos (normas ou metodologias).



### 3 Programa experimental

#### 3.1 Definição dos traços e moldagem dos corpos de prova

Na definição dos traços a serem utilizados, a principal preocupação foi a obtenção de argamassas e concretos de alta porosidade para que a penetração do CO<sub>2</sub> fosse rápida o suficiente para proporcionar resultados após 4 e 8 semanas de exposição na câmara acelerada de carbonatação. Algumas misturas iniciais foram realizadas para verificar a trabalhabilidade das argamassas e concretos, com a finalidade de se conseguir uma moldagem homogênea dos corpos-de-prova, sem falhas que pudessem comprometer os resultados de carbonatação. Na Tabela 1 são apresentadas as composições dos traços de argamassas e concretos com  $D_{m\acute{a}x} \leq 6,3$  mm.

Tabela 1 - Composição dos traços de argamassa e concreto.

Concretos	Traços			
	Cimento	Areia	Brita 0	Relação água/cimento
Argamassa	1	3,0	-	0,61
Concreto	1	2,1	1,4	0,61

Optou-se por trabalhar com argamassas e concretos em função de abranger os diferentes materiais na análise de um método de ensaio e pela busca de maior homogeneidade entre as amostras. O concreto é um material heterogêneo, onde o agregado graúdo dificulta a determinação da profundidade de carbonatação.

Outro ponto a destacar é o tamanho das amostras. Como a análise da carbonatação seria realizada em diversos laboratórios, com câmaras de carbonatação de capacidade limitada e, dependendo do centro de pesquisa, com um grande número de pesquisadores utilizando esses equipamentos, determinou-se que os concretos seriam confeccionados com agregado graúdo de  $D_{m\acute{a}x} \leq 6,3$  mm. Assim, foi possível trabalhar com amostras de menores dimensões, com diâmetro igual a 50 mm e altura de 100 mm, facilitando a realização do ensaio e o transporte desse material aos laboratórios participantes.

Após a moldagem dos corpos de prova, tomou-se o cuidado de colocar um filme de PVC e uma placa de vidro sobre as amostras, para evitar a perda excessiva de água e, conseqüentemente, a retração do material. Depois de 24 h, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados na câmara úmida, com  $95\% \pm 2\%$  de umidade relativa e 23°C de temperatura, por um período de 28 dias.

Os corpos-de-prova enviados aos laboratórios foram curados durante 14 dias e, após a retirada da câmara úmida, estes foram embalados individualmente em sacos plásticos utilizados para proteger alimentos à vácuo, selados a quente, para que a umidade relativa interna das amostras fosse mantida durante o transporte para os laboratórios. Os corpos-de-prova foram acondicionados em caixas de madeira conforme quantidade de ensaios confirmados pelos laboratórios participantes. O tempo total de cura foi de 28 dias.



### 3.2 Realização do ensaio de carbonatação acelerada

Após o recebimento dos corpos de prova e a finalização do período de cura, os laboratórios iniciaram a realização do ensaio. Destaca-se que o ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em 6 amostras, sendo utilizadas mais 5 amostras na determinação da quantidade de água a ser perdida para que se atinja a condição de 75% de umidade relativa. Durante essa determinação, as outras 6 amostras foram mantidas em ambiente de laboratório até o início do pré-condicionamento.

#### Pré-condicionamento

A etapa de pré-condicionamento corresponde ao período entre o término da cura e início do ensaio de carbonatação, especificamente à colocação das amostras na câmara de carbonatação. Nesta etapa os corpos de prova deveriam adquirir uma umidade relativa interna alta, cuja condição favoreceria a ocorrência da máxima taxa de carbonatação. Para tanto, foi necessária a determinação da massa de água que os corpos de prova necessitam perder para atingirem a umidade interna desejada (75%).

Após a determinação da concentração da umidade de equilíbrio e a determinação da perda de massa necessária durante a pré-secagem, iniciou-se efetivamente a etapa de pré-secagem dos corpos de prova que seriam expostos ao CO<sub>2</sub>. Após perderem a massa de água determinada, as amostras foram embaladas e mantidas na estufa ventilada a temperatura de 50°C, tomando-se o cuidado para que não houvesse a troca de umidade com o ambiente. Esta fase de redistribuição da umidade teve uma duração mínima de 14 dias.

#### Colocação das amostras na câmara de carbonatação

Após equilíbrio da temperatura com o ambiente (retirada das amostras da estufa e colocação em ambiente de laboratório), retirou-se os corpos de prova da embalagem e os mesmos foram levados para a câmara de carbonatação, nas seguintes condições:

- Umidade relativa =  $75 \pm 2\%$ ;
- Teor de CO<sub>2</sub> =  $5 \pm 1\%$
- Temperatura =  $23 \pm 2^\circ\text{C}$

### 3.3 Determinação da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi determinada após 4 e 8 semanas de exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação, após a aspersão da solução indicadora - solução de 1% de fenolftaleína em 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. As medidas foram feitas com o auxílio de um paquímetro, sendo obtidos 3 valores em cada lateral do corpo-de-prova.

### 3.4 Laboratórios participantes

Os laboratórios que aceitaram o convite para participar do Programa Interlaboratorial foram divididos em comerciais e os relacionados às universidades, conforme apresentado na Tabela 2. Cada um dos 9 laboratórios é identificado por um código (letra), o que garante a confidencialidade dos resultados.

Tabela 2 - Histórico dos laboratórios.

Característica	Laboratórios							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Descrição*	U	U	U	U	U	C	U	C

\* Universidade (U) ou Comercial (C)

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Resistência à compressão

Para caracterização dos materiais utilizados, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial nas idades de 14, 28 e 63 dias, apresentados a seguir. O ensaio foi realizado em 4 corpos de prova para cada idade, de acordo com a NBR 5739:2007. A evolução da resistência com a idade pode ser melhor visualizada na Figura 1.

Tabela 3 - Resistência à compressão axial da argamassa e concreto estudados.

Material	Idade (dias)		
	14	28	63
Argamassa	27,5	32,8	36,7
	28,0	34,5	42,4
	28,2	32,4	37,9
	28,5	32,1	39,9
<b>Média</b>	<b>28,1</b>	<b>32,9</b>	<b>39,2</b>
Concreto	28,8	35,7	37,6
	28,5	33,3	38,5
	28,6	34,6	40,3
	30,3	32,9	38,7
<b>Média</b>	<b>29,1</b>	<b>34,1</b>	<b>38,8</b>

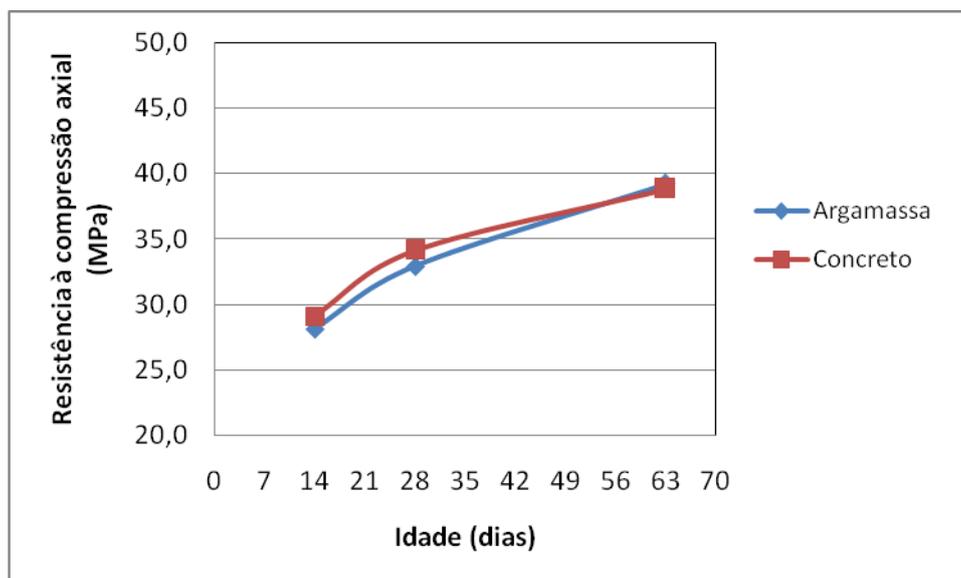


Figura 1 - Evolução da resistência à compressão com a idade.

## 4.2 Carbonatação acelerada

Nas Tabelas a seguir são apresentados os resultados obtidos pelos laboratórios participantes do Programa Interlaboratorial. Destaca-se que, neste ensaio, os participantes receberam as amostras ainda em processo de cura e somente após a finalização do processo (28 dias), iniciou-se o ensaio (pré-condicionamento, com posterior entrada na câmara de carbonatação).

### Pré-condicionamento

Os parâmetros da etapa de pré-condicionamento determinados por cada laboratório são apresentados a seguir.

Tabela 4 - Pré-condicionamento das amostras de argamassa.

Lab	$m_o$ (g)	$m_{al}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,75}$	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,75}$	$w_{e,75}$	$\Delta m$ (g)
A	422,20	375,8	48,6	0,1292	526,03	495,38	30,7	0,0619	25,2
B	421,24	374,95	46,3	0,1234	536,42	513,19	23,2	0,0453	28,9
C	420,60	375,50	45,1	0,1201	761,40	709,80	51,6	0,0727	17,8
D	421,52	378,08	43,4	0,1148	505,72	479,83	25,9	0,0530	24,0
E	421,21	377,13	44,1	0,1169	734,40	712,23	22,2	0,0311	34,4
F	426,60	379,50	47,1	0,1221	517,50	478,90	38,6	0,0806	15,5
G	416,76	373,01	43,8	0,1173	534,1	501,4	32,7	0,0652	18,9
H	Não enviou os resultados								

onde:

$m_o$  = massa do corpo-de-prova ao final da cura (g);  $m_{d1}$  = massa do corpo-de-prova após secagem em estufa (g);  $W_e$  = quantidade total de água evaporável (g);  $w_e$  = concentração da umidade evaporável;  $m_{e,75}$  = massa de concreto no equilíbrio com  $75 \pm 2\%$  de umidade relativa (g);  $m_{d2}$  = massa de concreto seca (g);  $W_{e,75}$  = quantidade de água de equilíbrio a  $75 \pm 2\%$  de umidade relativa (g);  $w_{e,75}$  = concentração da umidade de equilíbrio e  $\Delta m$  = massa perdida, calculada para cada material a ser ensaiado (g);

Tabela 5 - Pré-condicionamento das amostras de concreto.

Lab	$m_o$ (g)	$m_{d1}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,75}$	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,75}$	$w_{e,75}$	$\Delta m$ (g)
A	452,71	412,00	38,9	0,0932	546,89	520,49	26,4	0,0507	17,6
B	449,89	412,74	37,2	0,0900	551,97	534,65	17,3	0,0324	22,9
C	457,00	420,20	36,8	0,0879	895,60	854,40	41,2	0,0482	17,6
D	446,54	411,59	35,0	0,0849	486,98	468,84	18,1	0,0380	19,0
E	446,25	408,04	38,2	0,0936	854,7	838,1	16,2	0,0198	29,0
F	452,20	412,80	39,4	0,0926	522,3	493,6	28,7	0,0581	14,2
G	448,33	411,95	36,4	0,0883	575,8	549,3	26,5	0,0482	15,5
H	Não enviou os resultados								

Após a etapa de pré-condicionamento das amostras (perda de água para atingir a umidade interna de 75% e período de redistribuição da umidade), as amostras foram levadas à câmara de carbonatação, com concentração de  $CO_2$  igual a  $5 \pm 1\%$ , temperatura de  $23^\circ C$  e umidade relativa de 75%. O período de exposição foi de 4 e 8 semanas. Destaca-se que a quantidade de água a ser perdida pela argamassa foi de 15,5 g a 34,4 g e, pelo concreto, de 14,2 g a 29,0 g entre os laboratórios participantes.

### Medida da profundidade de carbonatação após a carbonatação acelerada

Os resultados da medida da carbonatação pelo método de aspersão da fenolftaleína são mostrados nas Tabelas 6 e 7, para a argamassa exposta durante 4 e 8 semanas, respectivamente e nas Tabelas 8 e 9, para o concreto. Foram ensaiados 6 corpos-de-prova por laboratório participante, para cada tipo de material.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada em argamassa após 4 semanas exposição.

Laboratórios	Medida da carbonatação (mm)					
	1	2	3	4	5	6
A	2,9	3,5	3,0	3,1	3,9	3,5
B	5,7	5,5	6,0	5,8	6,1	5,9
C	Não enviou os resultados					
D	1,2	1,0	0,9	0,9	1,1	0,7
E	15,1	16,4	16,1	17,0	17,2	16,7
F	COMPLETAMENTE CARBONATADOS: 25 mm					
G	7,1	6,8	6,6	6,7	6,8	7,5

Tabela 7 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada em argamassa após 8 semanas exposição.

Laboratórios	Medida da carbonatação (mm)					
	1	2	3	4	5	6
A	4,0	4,1	4,3	4,7	4,2	4,0
B	6,5	5,4	5,9	6,2	5,7	5,7
C	Não enviou os resultados					
D	1,0	0,7	0,9	1,0	0,7	1,0
E	COMPLETAMENTE CARBONATADOS: 25 mm					
F	COMPLETAMENTE CARBONATADOS: 25 mm					
G	6,5	9,2	7,0	7,7	6,8	6,3

Pelas Tabelas 6 e 7 verifica-se que a variabilidade foi alta. Somente com os resultados de 6 laboratórios, observa-se que, após 4 semanas de exposição, a profundidade média variou de 0,7 mm a 25,0 mm, ressaltando-se que foi realizado o mesmo procedimento de ensaio. Observa-se que o laboratório F foi o que apresentou maiores profundidades de carbonatação, os corpos de prova carbonataram por completo, seguido do laboratório E que apresentou valores em torno de 16 mm. Em relação ao pré-condicionamento, o laboratório F apresentou a menor quantidade de água a ser perdida, ao contrário do laboratório E, que determinou o dobro da quantidade de água a ser perdida pelo laboratório F.

Após 8 semanas, os corpos de prova ensaiados pelo laboratório E e F carbonataram por completo (25 mm), diferentemente do laboratório D, o qual apresentou menores profundidades de carbonatação, em torno de 1,0 mm. Esta elevada variabilidade demonstra claramente a importância de estudos de padronização neste campo.

Para melhor visualização, com os resultados médios obtidos, traçou-se a evolução da profundidade de carbonatação da argamassa em estudo para cada laboratório participante, em função do tempo (0, 4 e 8 semanas), conforme Figura 2.

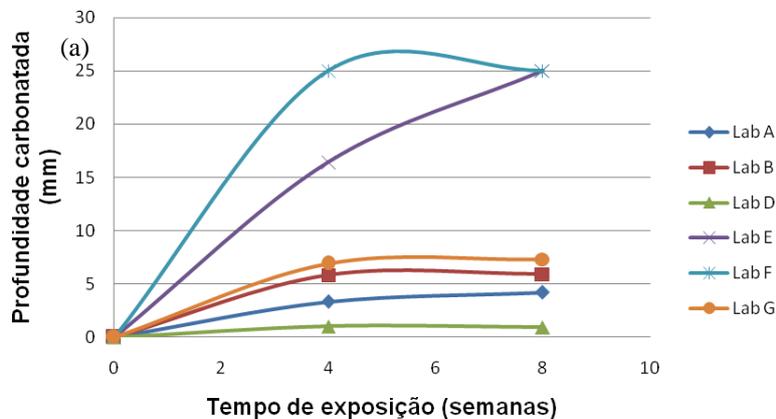


Figura 2 - Profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada em concreto após 4 semanas exposição.

Laboratórios	Medida da carbonatação (mm)					
	1	2	3	4	5	6
A	2,0	1,9	1,8	2,2	2,2	1,9
B	3,6	4,0	4,2	5,1	4,6	4,1
C	Não enviou os resultados					
D	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,2
E	12,0	12,6	13,0	11,6	12,6	12,8
F	14,2	18,0	19,6	18,7	19,8	18,4
G	4,3	6,1	6,4	5,5	5,7	5,8

Tabela 9 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada em concreto após 8 semanas exposição.

Laboratórios	Medida da carbonatação (mm)					
	1	2	3	4	5	6
A	2,7	2,6	2,5	2,8	2,7	3,0
B	5,3	4,8	5,6	3,9	4,8	4,9
C	Não enviou os resultados					
D	0,6	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4
E	20,7	CARBONATADOS		20,0	CARBONATADOS	
F	COMPLETAMENTE CARBONATADOS: 25 mm					
G	5,1	4,5	4,6	6,0	5,6	5,2

Para o concreto (Tabelas 8 e 9), verifica-se que a diferença entre as profundidades de carbonatação encontradas nos laboratórios participantes foi alta também. Após 4 semanas de exposição, a profundidade média variou de 0,2 mm a 25 mm (completamente carbonatados). Como no ensaio em argamassa, o laboratório F foi o que apresentou maiores profundidades de carbonatação, apresentando também uma menor quantidade de água a ser perdida durante a etapa de pré-condicionamento. O laboratório D foi o que verificou menores profundidades de carbonatação, em torno de 0,2 mm, sendo relatadas algumas dificuldades, como por exemplo em manter o teor de umidade da câmara em 75%.

A evolução da profundidade de carbonatação do concreto obtido em cada laboratório participante, em função do tempo (0, 4 e 8 semanas), é apresentada na Figura 3.

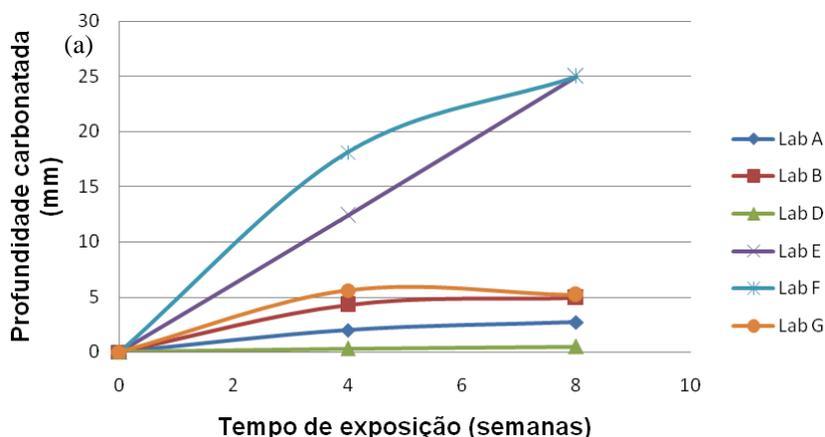


Figura 3 - Profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição.

A alta dispersão dos resultados entre os laboratórios foi confirmada no teste de Cochran, cujos resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Teste de Cochran - resultados obtidos na carbonatação acelerada.

Material	Exposição (semanas)	Valor calculado	Valor tabelado	
			1%	5%
Argamassa	4	0,633	0,520	0,445
	8	0,823		
Concreto	4	0,788		
	8	0,892		

Pela Tabela 10 observa-se que os resultados são considerados dispersos, ou seja, não podem ser aceitos, uma vez que os valores obtidos no teste de Cochran são maiores que o valor tabelado com nível de significância de 1% (para o número de réplicas e laboratórios iguais a 6). A ISO 5725:Parte 2 (1994) considera como “statistical outlier” os resultados maiores que o valor crítico com nível de significância de 1%.

Pela revisão de literatura apresentada nos artigos em anexo, observam-se claramente as divergências nos parâmetros adotados na realização dos ensaios de carbonatação acelerada e medida da carbonatação, porém esperava-se que, seguindo um mesmo procedimento, os resultados entre os laboratórios fossem relativamente próximos.

Algumas questões devem ser levantadas quanto à câmara da câmara, em especial ao teor de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade recomendados. Durante a realização do ensaio de carbonatação acelerada, vários problemas foram relatados e, em alguns casos, a dificuldade em se manter o teor de CO<sub>2</sub> em 5%. Alguns teores são controlados pela proporção volumétrica CO<sub>2</sub> e ar, outros buscaram junto ao meio técnico a compra do cilindro de CO<sub>2</sub> já com o teor recomendado. A estabilização da umidade relativa da câmara de carbonatação em 75% também foi problemática para alguns laboratórios, inclusive ainda na etapa de pré-condicionamento.

Além disso, outro ponto deve ser destacado: a diferença entre as câmaras de carbonatação. Na Figura 4 são apresentadas algumas das câmaras utilizadas ou que estão sendo usadas pelos laboratórios no Programa Interlaboratorial.



Figura 4 - Câmaras utilizadas em ensaios de carbonatação acelerada.

Assim, verifica-se também que os equipamentos utilizados são os mais variados possíveis, desde câmaras de carbonatação consideradas artesanais até equipamentos mais sofisticados, totalmente automatizados.



## 5 Conclusão

Observou-se que a variabilidade dos resultados de carbonatação acelerada foi alta e o principal fator que ocasionou a elevada variabilidade de resultados foi o tipo de equipamento utilizado e, conseqüentemente, a dificuldade em manter os teores de CO<sub>2</sub>, umidade relativa e temperatura do ambiente especificados. Verificou-se que não há um controle rigoroso desses parâmetros durante a realização dos ensaios.

A alta dispersão dos resultados entre laboratórios pode ter sido ocasionada também pelas diferenças na execução do pré-condicionamento, visto que alguns laboratórios utilizaram uma câmara úmida para estabilizar a amostra triturada em 75%, outros utilizaram a caixa plástica enviada aos laboratórios participantes. O tempo de estabilização da umidade em 75% variou bastante, sendo que, em alguns casos, pode ter ocorrido uma falsa estabilização. Para um mesmo material (argamassa), o laboratório F apresentou a menor quantidade de água a ser perdida, enquanto o laboratório E determinou o dobro da quantidade de água a ser perdida pelo laboratório F.

Assim, esta pesquisa confirma a importância da constituição das normas e critérios de análise nacionais, especialmente dos ensaios relacionados à durabilidade. Os resultados são de muita valia ao meio técnico e poderão ser utilizados na redação de textos normativos destinados aos ensaios de durabilidade de concretos expostos a meios ambientes agressivos, uma vez que o Brasil ainda não dispõe desses importantes métodos de ensaio.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e à Fundação de Auxílio à Pesquisa do Estado de São Paulo.

## 7 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. **ASTM E691**. Licenciado para Universidade de São Paulo-CRUESP. Disponível em: <<http://standards.astmpubs.com/Search.aspx?se=E691&type=Designatio>>.

ANDRADE, J. J. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análises das manifestações patológicas nas estruturas do estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

D'ALMEIDA, M. L. O.; PONÇANO, V. M. L.; MAKIYA, I. K. Rede IPT de Programas Interlaboratoriais. Publicação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **IPT Pub 4157**. São Paulo, 2004.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. McGraw-Hill Publishing Company. 3<sup>th</sup> Edition, 1986.



Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2014  
Outubro / 2014

@ 2014 - IBRACON - ISSN 2175-8182



LONG, A. E. Introduction to a Series of Technical Notes In-situ Non-destructive Testing Techniques. **Structures and Building**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. v.99, Feb, 1993.

OLIVIERI, J. C. **Programa Interlaboratorial: Proposta de Método para Interpretação de Resultados de Análises Químicas**. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 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 Recommendations TC 116-PCD. **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, 1999.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. RILEM Recommendations CPC-18. **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specification for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structural Engineering International**, nº. 4, 2004.

WAENY, J. C. C. Programas interlaboratoriais – Introdução à metodologia e análise dos resultados. Publicação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **IPT Pub 1140**. São Paulo, 1980.