

Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil

Accelerated carbonation: state-of-the art of the research in Brazil

Cristiane Pauletti
Edna Possan
Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Resumo

O estudo do comportamento do concreto ante a carbonatação se dá principalmente por meio de ensaios acelerados que, além do rígido controle das variáveis intervenientes no processo, oferecem baixo custo de execução e velocidade na coleta de dados. No Brasil, assim como em outros países, existe um grande número de trabalhos que procuram aperfeiçoar essa técnica, porém ainda não há um procedimento amplamente aceito que ofereça diretrizes para sua elaboração. Por meio deste trabalho, busca-se apresentar o estado da arte das pesquisas realizadas no Brasil, considerando a necessidade de unir esforços na elaboração de trabalhos futuros com vistas à normalização dos procedimentos de ensaio. Para tanto, verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos de carbonatação no que se refere aos percentuais de CO₂ empregados, ao tempo e tipo de cura e sazonalidade utilizados. Para fins de modelagem e previsão de vida útil, é importante investigar, também, o tamanho das amostras e o tempo de exposição ao CO₂, assim como fazer correlações entre ensaios naturais e acelerados para estabelecer coeficientes de aceleração¹. Essa relação entre os dois tipos de ensaio é imperativa no entendimento do fenômeno e também deve gerar subsídios para as futuras definições normativas.

Palavras-chave: Carbonatação acelerada. Carbonatação natural. Métodos de ensaio. Padronização.

Abstract

The study of the behaviour of concrete in relation to carbonation is undertaken mainly through accelerated tests that demand rigid control of the variables that intervene in the process, but that have low execution costs and short data collection duration. In Brazil, like in other countries, there has been a large number of research studies that have aimed to improve those tests. However, there is not yet a widely accepted procedure that offers guidelines for its execution. This article presents the state of art of the research that has been developed in Brazil, considering the need to gather efforts on the development of future studies and to establish standardized test procedures. It suggests that there is a need for in-depth studies on carbonation concerned with CO₂ concentrations, time and type of curing, and seasoning procedures adopted. For modelling and predicting service life it is also important to investigate the sample size and the exposure time to CO₂, as well as to identify correlations between natural and accelerated tests in order to establish acceleration factors. This relationship between the two types of test is very important for understanding the phenomenon and produce guidelines for future definitions of standards.

Keywords: Accelerated carbonation. Natural carbonation. Tests. Standardization.

Cristiane Pauletti
Núcleo Orientado para Inovação da
Edificação
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar,
Centro
Porto Alegre -RS - Brasil
CEP 90035-190
Tel.: (51) 3308-3518
E-mail:
cristianepauletti@yahoo.com.br

Edna Possan
Núcleo Orientado para Inovação da
Edificação
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
E-mail: epossan@gmail.com

Denise Carpena Coitinho Dal
Molin
Núcleo Orientado para Inovação da
Edificação
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
E-mail: dmolin@ufrgs.br

Recebido em 25/05/06
Aceito em 14/12/06

¹ O coeficiente de aceleração (α_a) é adimensional e expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação natural, sendo relativo aos concretos estudados e às condições de exposição impostas nos dois procedimentos de ensaio (POSSAN, 2004).

Introdução

A carbonatação, fenômeno em que o pH de materiais cimentícios é reduzido, ocorre pela reação físico-química entre os compostos hidratados do cimento e o CO₂ da atmosfera. O avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado à facilidade que o CO₂ encontra para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades do concreto.

Em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO₂), o processo de carbonatação pode requerer vários anos para apresentar dados passíveis de análise, sendo função da relação água/aglomerante e da composição química do cimento. Para relações água/aglomerante mais elevadas (acima de 0,60), com cerca de um ano de exposição ao CO₂, já é possível obter dados de profundidade carbonatada. Contudo, para concretos com relações água/aglomerante menores (inferiores a 0,50), o tempo demandado para determinar a velocidade de carbonatação pode levar até 20 anos (KOBUKU; NAGATAKI, 1989). Tentando reduzir esse tempo, muitas pesquisas são desenvolvidas com teores elevados de CO₂ (de 1% a 100%), acelerando a obtenção desses resultados. Essa aceleração do fenômeno de carbonatação, além da rápida resposta, também propicia um rígido controle do ambiente de exposição das amostras e aumenta a precisão da tomada de medidas devido à possibilidade de utilização de equipamentos sofisticados durante o monitoramento. Os resultados obtidos nos ensaios acelerados em laboratório, com todas as condições de entorno controladas, jamais ocorrerão na prática, ou seja, em situações reais de degradação, em que a influência das variáveis é aleatória. Entretanto, os materiais de construção, em especial o cimento, estão em constante evolução, exigindo que suas propriedades sejam conhecidas em curtos períodos, o que é possível com o emprego de ensaios acelerados. A utilização desses ensaios permite a obtenção de informações de durabilidade acerca de um novo material, antes que ele seja amplamente utilizado sem que se conheça seu comportamento ante a carbonatação.

Outro ponto imperativo no uso de ensaios acelerados de durabilidade é o fator econômico, pois propiciam uma substancial redução dos custos das pesquisas devido à redução do tempo necessário para a obtenção dos resultados.

Há cerca de 40 anos a carbonatação e seus fatores intervenientes vêm sendo estudados, com grande ênfase em várias partes do mundo; no entanto, até o momento, não existe um ensaio padronizado que uniformize os fatores envolvidos. Verifica-se que existem recomendações ou normas locais, as quais

ainda são pouco difundidas. Destas, tem-se conhecimento de um esboço de norma desenvolvido pelo Comité Européen de Normalisation (CEN, 2000), sob a designação prEN 13293, que prescreve a determinação da resistência de carbonatação de amostras feitas com produtos ou com sistemas de reparo, excluindo camadas de proteção, a partir de ensaios acelerados em laboratório e de uma recomendação para ensaios de carbonatação acelerada publicada pela Association Française pour la Construction (AFPC) e pela Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions (AFREM/AFPC) (1997). Destacam-se também o texto da RILEM CPC-18 (1988), o qual descreve parâmetros para a medição da profundidade de carbonatação, e a proposta da RILEM TC 116-PCD (1999), que especifica o acondicionamento de corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção de água. Essa carência dificulta, e até mesmo impede, a comparação fidedigna entre os diferentes estudos já realizados, sobretudo quando o objetivo deles é a modelagem matemática do fenômeno de carbonatação. Essa falta de padronização diz respeito, principalmente, aos fatores ambientais e aos procedimentos de ensaio, enquanto os materiais constituintes, geralmente, são as variáveis objeto de estudo. Os fatores ambientais estão relacionados à umidade, temperatura e concentração de dióxido de carbono (CO₂). Os procedimentos de ensaio referem-se ao tipo e tempo de cura, ao tipo e tempo de sazonalização², ao tipo, tamanho e forma das amostras, entre outros. Já os materiais constituintes estão relacionados ao tipo de cimento, tipo e teor de adições, uso de aditivos e tipos de agregados utilizados na produção de concretos ou argamassas.

Assim, para que se possa contribuir para a orientação e futura padronização dos ensaios de carbonatação acelerada, o presente trabalho apresenta o estado da arte desses estudos no Brasil, destacando os principais fatores intervenientes na realização deles. Também são sugeridas algumas linhas de pesquisa que necessitam ser mais bem exploradas para fins de normalização.

² O sazonalização constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, antes de os corpos-de-prova serem submetidos à ação do CO₂.

Estado da arte das pesquisas de carbonatação realizadas no Brasil

Em 1963, ao escrever o livro “*Properties of concrete*”, Neville torna-se o pioneiro na publicação sobre a degradação do concreto devido à carbonatação, e em 1969 Smolczyk, Hamada e Meyer, entre outros, abordam o tema com maior ênfase, inserindo na ocasião, os primeiros modelos de previsão da profundidade carbonatada. Desde então vários estudos referentes ao tema foram publicados e muitos dos fatores intervenientes estão sendo aos poucos esclarecidos.

Um dos trabalhos de grande destaque na área foi o publicado por Ho e Lewis (1987), no qual se apresenta uma correlação entre ensaios de carbonatação acelerada e ao natural. Nesse trabalho, para um teor de CO₂ de 4%, cura de 7 dias com temperatura de 23 °C e UR de 50%, os autores sugerem que um ano de ensaio natural equivale a uma semana de carbonatação acelerada. Parrot (1987) também colabora para o avanço dos estudos da carbonatação do concreto apresentando uma ampla revisão sobre o tema e, em 1990, propõe uma classificação para os danos decorrentes da carbonatação em estruturas de concreto armado. Pouco depois, com base em ensaios acelerados, Padadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991a, 1991b, 1992) apresentam grandes avanços da modelagem do fenômeno de carbonatação avaliando, principalmente, a difusibilidade do CO₂ no concreto. Saetta e Vitaliani (2004) publicaram um modelo para predição da carbonatação e da vida útil das estruturas de concreto armado, o qual contempla os parâmetros que governam as reações de carbonatação, fazendo uma interação entre o material e o ambiente. No mesmo ano, Bary e Sellier (2004) também apresentam um modelo de carbonatação baseado nas equações de conservação de massa (de água, de CO₂ e de cálcio na solução dos poros), o qual foi aperfeiçoado por Duprat *et al.* (2006).

A literatura indica que o fenômeno continua sendo estudado e que apresenta progressos. No entanto, com relação à modelagem, é possível que haja uma dificuldade prática quando da utilização desses modelos para o cálculo das estruturas, uma vez que algumas variáveis (como quantidade de Ca(OH)₂, difusividade de CO₂, entre outras) podem ser facilmente obtidas em laboratório, mas não em campo. A difusão de meios para cálculo pode corroborar nesse sentido.

No Brasil, Helene dá início ao estudo da carbonatação do concreto com o trabalho “corrosão das armaduras em concreto armado” publicado em 1981 no Simpósio de aplicação da tecnologia do concreto. Em 1986, o mesmo autor publica o livro “corrosão em armaduras para concreto armado” abordando com maior destaque os malefícios da carbonatação nas estruturas de concreto armado.

É importante ressaltar que os trabalhos acadêmicos pioneiros realizados no Brasil com vistas à carbonatação, geralmente, analisavam o sistema concreto/aço, onde o tipo de aço e os tratamentos e pinturas superficiais das armaduras eram as variáveis do projeto de experimentos.

Os primeiros estudos que buscaram o entendimento dos principais fatores que envolvem o fenômeno da carbonatação no concreto foram publicados somente em 1989. Nesse ano, Wolf e Dal Molin apresentaram resultados de ensaios em corpos-de-prova produzidos com tipos de cimentos variados. Já Andres (1989 *apud* KAZMIERCZAK 1995) apresentou resultados de carbonatação em corpos-de-prova de argamassa com variações na idade, na relação água/cimento, no tipo de cura e no tipo de cimento. Em 1993, Helene publica sua tese de livre-docência, em que o tema carbonatação do concreto é abordado com destaque.

A partir dessas publicações, vários trabalhos acadêmicos relacionados ao tema vêm sendo desenvolvidos em todo o país, principalmente nas Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, onde estão concentrados os maiores grupos de pesquisa na área. Os principais trabalhos acadêmicos em concreto e argamassas realizados no Brasil são apresentados no Quadro 1.

Pesquisador	Ano	Tipo material	Forma/dim amostras (mm)	Tipo e tempo cura (dias)	Sazonamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)
Wolf e Dal Molin ^{c 3}	1989	argam.	cilindros 50x100	submersa 7	-	30, 50, 70 e 90	-	-
Wolf ^{c 4}	1991	argam.	cilindros 50x100	úmida 28	A etapa de sazonalimento não foi realizada. Depois da cura, as amostras seguiram direto para o ensaio de carbonatação	-	-	-
Nepomuceno ^a	1992	concreto ⁵	prismas 20x55x80	úmida/ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100
Bauer ^a	1995	argam.	cilindros 50x100	úmida 63	15 dias estufa a 50 °C, depois lab. cte massa	entre 65 e 70	-	50
John ^b	1995	argam.	prismas 40x40x160	-	-	-	21,5	5
Isaia ^c	1995	concreto	cilindros 100x100	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10
Kazmierczak ^c	1995	argam.	prismas 55x80x20	submersa 7	câmara sazonal.	-	-	100
Monteiro ^b	1996	argam.	prismas 60x80x25	úmida 7 e 28	15 dias laboratório	entre 50 e 70	24	100
Sierra ^b	1996	concreto	cilindros 100x200	submersa 7 dias	-	maior que 80	24	5
Lopes ^a	1999	concreto	cilindros 100x200	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100
Seidler ^c	1999	argam.	prismas 40x40x160	úmida 28	7 dias câmara sazonal.	68	21	5
Vaghetti ^c	1999	concreto	cilindros 100x100	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10
Alves ^c	2000	concreto	cilindros 100x70	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5
Cunha e Helene ^b	2001	concreto	prismas 279x152x114	úmida 28	15 dias laboratório	65	23,5	100
Coelho <i>et al.</i> ^b	2002	concreto	cilindros 100x200	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100
Silva ^b	2002	concreto argam.	cilindros 50x100	úmida 7	-	60	25	100
Venquiaruto ^c	2002	concreto	cilindros 100x70	úmida 7	35 dias laboratório/ estufa RILEM	75	23	5

Nota: pesquisas realizadas em: (a) Região Centro-Oeste; (b) Região Sudeste; e (c) Região Sul do Brasil.

Quadro 1 - Características dos estudos de carbonatação realizados por diversos pesquisadores

^{3,4} Ensaio de carbonatação natural em laboratório, com teor de CO₂ do ambiente.

⁵ O autor utilizou concretos de reparo.

Pesquisador	Ano	Tipo material	Forma/dim amostras (mm)	Tipo e tempo cura (dias)	Sazonamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)
Medeiros ^b	2002	argam.	prismas 60x60x120	úmida 3	25 dias seca - UR 50%	65	24	5
Kulakowski ^c	2002	concreto argam.	prismas 100x100x300 40x40x160	úmida embaladas 14	14 dias câmara sazón.	70	25	5
Vieira ^c	2003	concreto	100x100x60	úmida 28	7 dias estufa (50 °C), 14 dias em sala clim.	70	25	≥50
Kirchheim ^c	2003	concreto	prismas 60x60x180	úmida 28	até constância câmara sazón.	70	25	100
Abreu ^c	2004	concreto	prismas 100x100x60	úmida 28	32 dias câmara sazón.	70	25	5 e ≥50
Pauletti ^c	2004	argam.	prismas 40x40x160	submersa 7 e 28	RILEM e sala clim. massa cte. + mín.14 d redistrib.	70	20	6 e ≥60
Bourguignon ^b	2004	concreto	cilindros 100x200	úmida 15	49 dias seca - UR 50%	65	26	95±5

Nota: pesquisas realizadas em: (a) Região Centro-Oeste; (b) Região Sudeste; e (c) Região Sul do Brasil.

Quadro 1 (continuação) - Características dos estudos de carbonatação realizados por diversos pesquisadores

Os espaços em branco, no Quadro 1, indicam que nem todas as pesquisas relatam todas as variáveis envolvidas no processo. Essa falta de informações, aliada à dispersão dos fatores intervenientes (provenientes da inexistência de padronização), faz com que a comparação e a correlação de resultados de diferentes estudos sejam prejudicadas, pois a carbonatação pode assumir comportamentos distintos para cada um dos fatores envolvidos. Também se nota que o teor de CO₂, a umidade relativa e a temperatura apresentam intervalos de variações de 5% a 100%, de 30% a 90% e de 20 °C a 27 °C, respectivamente. Variações ainda maiores são verificadas nos processos de sazónamento, cura e dimensão das amostras. Estes e outros fatores são discutidos na seqüência.

Concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar

A concentração de CO₂ é um fator bastante relevante para o avanço da profundidade de carbonatação. As pesquisas relacionadas no Quadro 1 mostram a escassez de trabalhos que contemplem diferentes percentuais de CO₂ num mesmo estudo. Pauletti (2004) verificou o comportamento da carbonatação de argamassas ante a ação de 6% e ≥60% de CO₂. Os resultados mostraram-se estatisticamente significativos, sendo

a carbonatação, surpreendentemente, 2,16 vezes superior nas amostras ensaiadas com 6% de CO₂. Abreu (2004) também obteve profundidades de carbonatação inferiores para teores de CO₂ próximos à saturação quando comparados com os resultados obtidos a 5% de CO₂. Estudos realizados por Sanjuán e Olmo (2001), em atmosferas com 5%, 20% e 100% de CO₂, apontam para profundidades de carbonatação maiores nos corpos-de-prova carbonatados com percentual de 100%. Os pesquisadores calcularam os coeficientes de difusão do CO₂ e encontraram valores incomuns na prática para o percentual de 100%. Os autores recomendam testes com percentuais de CO₂ inferiores a 20%, pois acreditam que, em elevadas concentrações desse gás (próximas da saturação), ocorram mudanças microestruturais, não desenvolvidas em concentrações menores. Uomoto e Takada (1993), verificando a influência do teor de CO₂ no avanço da frente de carbonatação, submeteram espécimes de concreto a concentrações de CO₂ de 0,07% (ambiente natural interno), 1% e 10% (teste acelerado), sob temperatura e umidade controladas (T=20 °C e UR=55%). Segundo os autores, para as relações água/cimento estudadas, o aumento do teor de CO₂ elevou a velocidade de carbonatação dos concretos.

Diante do exposto, constata-se que a elevação do teor de CO₂ nem sempre conduz a maiores profundidades de carbonatação do concreto. Os estudos supracitados parecem indicar que essa propriedade aumenta com o acréscimo do percentual de CO₂ até determinada concentração, a qual ainda é desconhecida. Considerando que a hipótese anterior seja verdadeira, os percentuais de CO₂ empregados nos ensaios de Uomoto e Takada (1993) podem ser inferiores ao limite de concentração na qual a carbonatação passa a ser menor. Mais estudos precisam ser realizados para confirmar ou refutar a queda no avanço da frente de carbonatação, provavelmente devida a mudanças na microestrutura, a partir de uma dada concentração de CO₂.

Com relação à temperatura, esta praticamente não exerce influência na carbonatação entre 20 °C e 40 °C (PAPADAKIS *et al.*, 1991b), pois o processo ainda é controlado pela difusão. Neville (1997) concorda que pequenas variações de temperatura pouco influenciam na profundidade carbonatada.

A umidade relativa afeta a carbonatação, sendo em condições de baixa umidade (inferiores a 50%) a carbonatação menor, porque não haverá água para dissolver o CO₂; e em condições de saturação de água dos poros, a carbonatação também será menor, porque a difusão de CO₂ é muito pequena. De forma geral, os pesquisadores indicam valores compreendidos entre 50% e 85%. Conforme o Quadro 1, um percentual muito utilizado se encontra em torno de 70%.

Os efeitos de umidade relativa e temperatura já foram contemplados em diversos estudos, e seus efeitos já são mais bem compreendidos. O que realmente carece de mais estudos são as concentrações de CO₂ que devem ser empregadas para a realização dos ensaios acelerados de carbonatação.

Tipo, tamanho e forma das amostras

Ao realizar comparações entre pesquisas, o tipo e a forma das amostras também devem ser levados em conta. Kulakowski (2002) fez uma comparação entre a profundidade de carbonatação de amostras de argamassa cilíndricas (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm) e prismáticas (com dimensões de 40x40x160 mm), para um mesmo material e iguais condições de exposição. A pesquisadora constatou que o corpo-de-prova prismático apresentou uma profundidade de carbonatação média de 9,23 mm, enquanto para o corpo-de-prova cilíndrico esse valor foi de 13,81 mm, ou seja, cerca de 50% maior. A razão disso é atribuída à possível soma de vetores na difusão do CO₂ das

amostras cilíndricas. No exemplo citado, as amostras não foram impermeabilizadas em nenhuma das faces e foram rompidas transversalmente à face de menores dimensões. Os pesquisadores que utilizaram corpos-de-prova cilíndricos (ISAIA, 1995; VAGHETTI, 1999; VENQUIARUTO, 2002; entre outros), em geral, impermeabilizaram as laterais e romperam diametralmente essas amostras, evitando, assim, a soma de vetores na difusão do CO₂.

As dimensões dos corpos-de-prova geralmente estão relacionadas com a quantidade de medidas a serem realizadas e com o tempo de medição das profundidades carbonatadas. O emprego de cubos e cilindros é conveniente quando se pretende realizar a medição em uma ou duas idades específicas. Já o emprego de prismas é mais interessante quando se deseja obter um número maior de idades de ensaio. Ressalta-se que corpos-de-prova de dimensões muito reduzidas não permitem o estudo do fenômeno por tempos de exposição ao CO₂ muito prolongados, pois podem carbonatar completamente antes do término do ensaio. Possan (2004) relata que ensaios mais prolongados de carbonatação acelerada podem abranger o período de atenuação do fenômeno, fato de grande importância para seu entendimento em idades mais avançadas.

Com relação a diferentes materiais, percebe-se que diversos pesquisadores (Quadro 1) optam por trabalhar com argamassas, a fim de minimizar a influência do agregado graúdo na determinação da frente de carbonatação. Além disso, em comparação ao concreto, os corpos-de-prova de argamassa podem ter dimensões reduzidas e, como consequência, a quantidade de material demandado para a confecção dos corpos-de-prova será menor ou então uma quantidade maior de amostras pode ser disposta nas câmaras de carbonatação. Kulakowski (2002), analisando concretos e argamassas (feitas a partir do proporcionamento dos concretos, através da retirada do agregado graúdo e sua água de absorção), constatou que as profundidades de carbonatação dos concretos foram inferiores às das argamassas, especialmente para a relação água/aglomerante elevada (0,70). Khunthongkeaw *et al.* (2006) avaliaram o efeito da adição de cinza volante na carbonatação de concretos e argamassas. Sob as mesmas condições de mistura, para teores de adição menores que 30%, os coeficientes de carbonatação entre os dois materiais foram similares. Já para teores mais elevados de cinza volante (50%), os resultados em argamassas apresentam coeficientes de carbonatação muito superiores aos observados em concreto (KHUNTHONGKEAW *et al.*, 2006). As pastas geralmente são utilizadas para fins

específicos, como, por exemplo, para análise dos compostos da carbonatação, e para isso convém minimizar a presença dos compostos dos agregados.

Ressalta-se que os resultados apresentados por Kulakowski (2002) apresentam boas correlações entre argamassas e concretos, o que indica a possibilidade de utilização de ambos para os ensaios de carbonatação acelerada. Todavia, o ensaio de carbonatação realizado em argamassas apresenta caráter comparativo, e a extrapolação dos resultados para concretos com vistas à previsão de vida útil não é aconselhável, pois as microestruturas são distintas. Se o objetivo é pesquisar a carbonatação de concretos estruturais, o ensaio deve, preferencialmente, ser realizado em concretos.

O efeito da forma das amostras parece estar bem compreendido, assim como a influência do tipo de material e em quais casos cada um se aplica. Já o tamanho dos corpos-de-prova, principalmente para fins de modelagem, necessita ser explorado, pois o conhecimento da tendência de estacionamento do fenômeno é um fator de importância. Essas observações são relevantes para os estudos de durabilidade e carecem de procedimentos normalizados, a fim de uniformizar a coleta de dados.

Tipos de cura e sazonalidade

No que se refere ao tipo de cura empregada, nota-se, no Quadro 1, que a grande maioria dos pesquisadores opta pela realização de cura úmida ou submersa, com uma tendência de duração do período de 7 e 28 dias. Destaca-se que Bauer (1995) submeteu as amostras por tempos de cura mais prolongados (63 dias). Já Kulakowski (2002) optou por um período de cura de 14 dias, e para isso as amostras foram embaladas com filme de PVC e procedeu-se à cura com a água de amassamento, dentro da câmara úmida. Deve-se levar em conta que materiais com adições pozolânicas requerem maior tempo de cura para o desenvolvimento das reações (cerca de 28 dias para o seu início) e que eles seriam desfavorecidos com períodos curtos de cura, aspecto que merece reflexão. Essa discrepância entre os tempos e o tipo de cura deve ser considerada quando se pretende fazer correlações entre os diversos trabalhos, visto que a cura interfere na microestrutura do concreto e, conseqüentemente, as variações decorrentes dos processos irão interferir no avanço da frente de carbonatação do concreto.

Outro fator de importância é a idade de exposição ao CO₂. Concretos produzidos com adições pozolânicas, em relação aos sem, demandam maiores tempos para se hidratar. Logo, quando um ensaio é iniciado antes desse período, as reações de hidratação ainda estão em desenvolvimento e, obviamente, a microestrutura desse material é distinta.

Os trabalhos relacionados no Quadro 1 também mostram que a divergência no procedimento de sazonalidade (também denominado de acondicionamento) é bastante elevada. Muitos pesquisadores adotam colocar as amostras em ambiente de laboratório por um período predeterminado, mas é preciso chamar a atenção de que esse ambiente é muito variável, mais ainda se comparado entre as diferentes regiões do país. Seria necessário pelo menos fazer uso de um ambiente com temperatura e umidade constantes.

Outro procedimento de sazonalidade adotado por alguns pesquisadores é o prescrito pela RILEM TC 116-PCD (1999). Nessa recomendação técnica, na parte "A", é especificado o acondicionamento de corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção de água. Conforme descrito na recomendação, após a cura, os corpos-de-prova devem ser colocados em estufa a 50±1 °C até alcançar a perda de massa preestabelecida. Em seguida, devem ser embalados de forma a impedir a perda ou o ganho de umidade e permanecem na estufa por mais 14 dias, para redistribuição da umidade restante na amostra. Após o período de redistribuição de umidade, os corpos-de-prova devem ser levados para a sala climatizada, onde será realizado o ensaio de carbonatação, e eles permanecem embalados por mais 24 horas para que sua temperatura se iguale à da sala. Em seguida, as embalagens são abertas e as amostras colocadas nas câmaras de carbonatação. Segundo a própria RILEM TC 116-PCD (1999), esse procedimento é recomendado sempre que se deseja obter umidade uniforme nas amostras de ensaio, fator de interesse para os ensaios de carbonatação.

O grupo de pesquisas do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) tem adotado para suas pesquisas o sazonalidade em sala climatizada. Esse procedimento consiste em dispor os corpos-de-prova a serem carbonatados sobre grades plásticas, na bancada de uma sala climatizada, e monitorá-los até que se obtenha constância de massa⁶ (diferença de 0,10 g entre duas leituras

⁶ A RILEM (1999), nas recomendações do TC 116-PCD, estabelece que a constância de massa é atingida quando os corpos-de-prova apresentam diferença igual a 0,1 g entre duas leituras consecutivas de 24 horas.

consecutivas de 24 horas). Ao contrário da RILEM TC 116-PCD (1999), esse procedimento não garante a quantidade de água no interior dos corpos-de-prova, interferindo nos resultados de profundidade de carbonatação obtidos. Até poucos anos atrás (cerca de 5 anos), as amostras do NORIE eram sazoadas em câmaras de sazoadamento, nas quais o ar do seu interior passava por uma solução de KOH para retirada do CO₂. Entretanto, o seu uso tem-se mostrado ineficiente, uma vez que não há troca de ar com o meio externo e a umidade das amostras, no interior da câmara, acaba se igualando entre si, mas não atinge a umidade requerida, do ambiente controlado. O uso de soluções salinas para controle da umidade já foi investigado (ROY *et al.*, 1999) e talvez pudesse ser empregado dentro das câmaras de sazoadamento.

O trabalho realizado por Pauletti (2004) faz uma comparação entre os procedimentos de sazoadamento da RILEM e do NORIE, e mostra que a velocidade de avanço da carbonatação é maior quando as amostras são sazoadas pelo método da RILEM. Provavelmente a diferença seja devida a que nos ensaios do NORIE o teor de umidade interna seja superior (ou inferior) ao valor máximo considerado pela RILEM (em torno de 70%). Nos ensaios da RILEM é conhecido o teor de umidade interna do corpo-de-prova, enquanto o procedimento do NORIE não.

Outro aspecto importante a ser considerado é a idade dos corpos-de-prova quando são submetidos à ação do CO₂. As pesquisas que realizam procedimentos de sazoadamento dificilmente evidenciam se as amostras são submetidas ao ensaio de carbonatação assim que atingem a condição predeterminada (cada traço com uma idade diferente), ou se todas as amostras vão para o ensaio juntas (todas com a mesma idade). As diferenças entre o tempo que as amostras permanecem em sazoadamento fazem com que elas tenham maior ou menor possibilidade de hidratação, como também umidades internas distintas, o que faz com que a carbonatação não avance de forma semelhante. Essa questão também foi verificada por Pauletti (2004), que levou um grupo de amostras ao ensaio de carbonatação assim que atingiram a condição de umidade preestabelecida, mais um período de redistribuição de 14 dias, e outro grupo em que se iniciou o ensaio após o último corpo-de-prova alcançar a

umidade requerida mais 14 dias de redistribuição. Verificou-se estatisticamente que há influência desse tempo de sazoadamento na profundidade de carbonatação.

Na tomada de decisão sobre quais os procedimentos ideais para a elaboração de uma normalização, devem ser levados em conta o tempo e a dificuldade/facilidade de execução dos ensaios, sem deixar dúvidas nem margem para interpretações dúbias. A recomendação descrita pela RILEM TC 116-PCD (1999) garante o teor e a distribuição da umidade interna dos corpos-de-prova, fato de suma importância no estudo da carbonatação, no entanto a proposta não é clara, ao não deixar evidente a idade dos corpos-de-prova para cada etapa do procedimento. Além disso, se uma mesma hidratação for considerada para as amostras utilizadas para obter o grau de saturação e aquelas que serão propriamente ensaiadas à carbonatação, uma moldagem prévia faz-se necessária, questão que também não é contemplada na citada recomendação.

Necessidade de padronização

Esse panorama dos ensaios de carbonatação realizados no Brasil aponta a necessidade de um ensaio padronizado, a fim de unificar ou uniformizar os dados coletados. Por meio da padronização acredita-se que se iniciaria a geração de uma base de dados relativos à durabilidade, que então poderiam ser empregados, com certa segurança, para fins de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado.

Nesse sentido, os aspectos que merecem destacada atenção são os relacionados à concentração de CO₂, tipo e tempo de cura, e os procedimentos de sazoadamento, utilizados nos diversos trabalhos. Além destes, o tamanho das amostras também deve ser analisado. Os demais fatores intervenientes já são mais bem compreendidos e acredita-se que existam dados suficientes para a definição deles e um futuro encaminhamento para uma normalização.

Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático do estado atual das pesquisas sobre carbonatação acelerada no Brasil, agrupando os fatores que a influenciam e indicando os que são compreendidos (✓) e os que ainda carecem de pesquisa (✗).

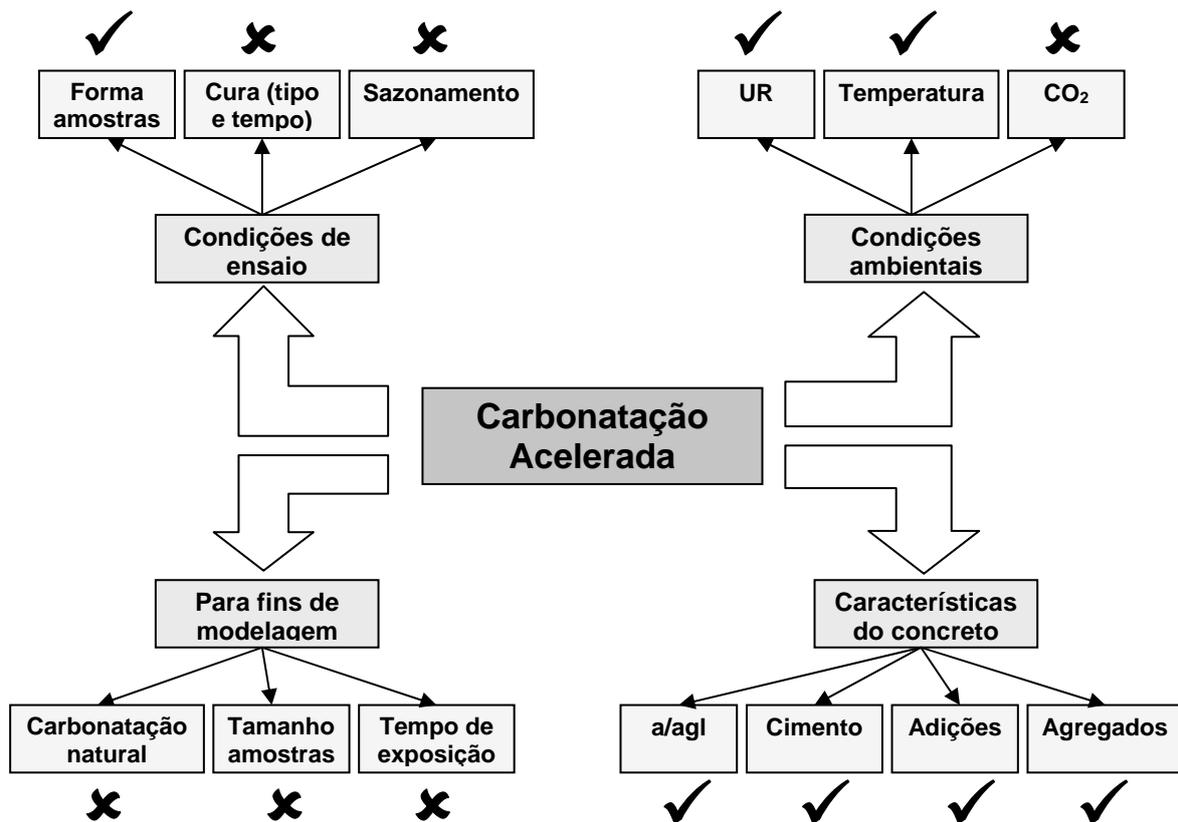


Figura 1 - Esquema do estado da arte das pesquisas de carbonatação acelerada no Brasil

Como observado no Quadro 1 e ilustrado na Figura 1, a concentração de CO_2 é um fator que merece maior investigação. As pesquisas que analisaram diferentes percentuais de CO_2 (ABREU, 2004; PAULETTI, 2004; SANJUÁN; OLMO, 2000) parecem apontar para o uso de concentrações menores (cerca de 5%). Sugere-se que mais estudos sejam realizados contemplando vários percentuais de CO_2 (1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70% e 100%), a fim de elucidar se realmente há uma queda na velocidade de penetração da frente de carbonatação a partir de determinada concentração e em qual intervalo isso ocorre. É importante correlacionar ensaios de carbonatação tanto acelerada quanto natural para verificar se há diferença no comportamento e tendência do fenômeno nas distintas condições. Isso também irá contribuir na definição do percentual de CO_2 mais adequado para a realização dos ensaios acelerados. Por outro lado, a influência da temperatura e da umidade relativa na carbonatação do concreto é mais bem compreendida e poderia ser fixada para a realização de futuros estudos.

Com relação às condições de ensaio, destaca-se que o tipo (submersa, úmida ou ao ar) e o tempo de cura (7, 14, 28 ou mais dias) também devem ser explorados. Para a realização dos ensaios de carbonatação, o tempo e o tipo de cura precisam ser fixados. Depois de curados e antes de entrarem na câmara de carbonatação, os corpos-de-prova devem ser sazoados. O ideal é que esse processo garanta o equilíbrio da umidade interna dos corpos-de-prova permitindo que a difusão do CO_2 ocorra uniformemente no material. De que forma? Qual o melhor procedimento? Quanto tempo? Essas são algumas das questões que a comunidade acadêmica ainda precisa esclarecer para então padronizar o procedimento de sazoadamento das amostras que serão carbonatadas. Salienta-se que o ambiente a que os corpos-de-prova são submetidos antes da realização do ensaio e o tempo que esse procedimento demanda são de suma importância para o ensaio de carbonatação. Nessa definição, deve-se levar em conta a disponibilidade dos ambientes e de execução do procedimento para a tomada de decisão no momento de elaborar uma normalização. Nesse sentido, ainda são necessários estudos que busquem uma solução eficiente, que

propicie a realização de um ensaio confiável sem excessivo trabalho de laboratório.

Com relação ao tamanho das amostras para a realização de ensaios de carbonatação de longa duração, seja acelerado ou não, Possan (2004) sugere que alguns cuidados devem ser tomados durante o seu planejamento e execução. Uma das observações necessárias está vinculada às dimensões dos corpos-de-prova, as quais devem ser iguais ou superiores ao dobro da espessura de cobertura do concreto especificada na NBR 6118 (ABNT, 2003). Também se acredita que para fins de modelagem e, conseqüentemente, melhor aproximação da vida útil das estruturas de concreto, o ensaio de carbonatação acelerado deve ser conduzido até a obtenção da curva de tendência ao estacionamento do fenômeno, que normalmente é alcançado com períodos mais longos de exposição ao CO₂. Esse aumento na dimensão dos corpos-de-prova e do tempo de ensaio acarreta algumas dificuldades, entre as quais podem se destacar: o acréscimo do tempo de ensaio e a conseqüente demora na obtenção dos dados; a necessidade de câmaras de carbonatação de maior tamanho; a dificuldade de manuseio dos corpos-de-prova; e, principalmente, a elevação dos custos dos ensaios. Assim, mostra-se necessário um estudo aprofundado da viabilidade técnico-econômica da proposta. Com vistas à comparação do desempenho de diferentes concretos ante a ação de CO₂, amostras de menores dimensões são adequadas.

Dados provenientes de ensaios de carbonatação natural também são necessários para o estabelecimento de coeficientes de aceleração e a conseqüente modelagem dos dados para predição de vida útil. Nesse sentido, de forma determinística, Possan (2004) buscou estabelecer esses coeficientes empregando dados do projeto de Dal Molin *et al.* (1997). Para uma relação água/aglomerante de 0,80, com 0% e 20% de adição de sílica ativa, os coeficientes de aceleração encontrados foram de 31,15 e 35,49, respectivamente. Esses coeficientes indicam que no ensaio acelerado o fenômeno de carbonatação, quando comparado com o natural, foi acelerado em, aproximadamente, 31 vezes quando a sílica ativa é ausente e 35,5 vezes quando se tem 20% dessa adição. Cabe ressaltar que são raros os trabalhos que tentam estabelecer esses coeficientes ou a correlação entre as duas abordagens de ensaio, destacando os esforços de Ho e Lewis (1987), Ceukelaire e Nieuwenburg (1993) e Possan (2004), todos com abordagem determinística. Para fins de previsão de vida útil, com a devida inserção da aleatoriedade das variáveis envolvidas no processo de carbonatação, destaca-se ainda a

necessidade de estudos probabilísticos na determinação dos coeficientes.

Acredita-se que, após definidas todas as variáveis intervenientes na execução e o conseqüente controle dos procedimentos de ensaio de carbonatação, o estudo desse fenômeno irá gerar resultados mais confiáveis e passíveis de maiores correlações. Caberá ao pesquisador não a verificação da influência das variáveis de ensaio, e sim da profundidade de carbonatação do concreto em função das alterações de suas características, seja por mudanças no tipo de cimento, agregado, adições e relação água/aglomerado, entre outras. Esse fato também facilita a reprodução de experimentos por pesquisadores em locais distintos, possibilitando a comparação dos dados.

Em face das discrepâncias e avanços anteriormente discutidos, destaca-se que, para maior entendimento do fenômeno, bem como para fins de modelagem e previsão da vida útil, o ensaio de carbonatação acelerada precisa ser discutido entre os núcleos de pesquisa objetivando a padronização dele. Essa discussão é de suma importância, visto que ainda existem alguns aspectos que devem ser mais bem compreendidos para que a padronização seja bem-sucedida.

Conclusões

O estado da arte das pesquisas de carbonatação acelerada no Brasil, apresentado neste trabalho, mostra que, apesar de muito ter sido feito, não há qualquer padronização nos procedimentos e parâmetros de ensaio.

Entre os fatores que influenciam a carbonatação, alguns já são bem compreendidos (forma das amostras, umidade relativa, temperatura), outros são intrínsecos ao material que está em estudo (relação água/aglomerado, tipo de cimento, adições, agregados) e outros, ainda, carecem de pesquisas (tipo e tempo de cura, sazonalidade, concentração de CO₂, tempo de exposição, tamanho das amostras e correlação com ensaios naturais).

Para a elaboração de uma norma, todos os fatores mencionados devem ser considerados, assim como a facilidade ou dificuldade de execução dos procedimentos e a disponibilidade e custo dos equipamentos. Porém, é muito importante que essas escolhas resultem em dados que remetam à realidade, ou seja, os ensaios acelerados devem representar o comportamento da carbonatação em situações reais. Para que isso seja possível, os ensaios acelerados devem ser comparados com ensaios realizados em condições naturais, assegurando que a definição dos parâmetros de

norma atenda a tais condições. Algumas dessas correlações são apresentadas por Possan (2004), e outros estudos estão sendo realizados por Pauletti (tese a ser defendida).

Diante do exposto, para o entendimento do fenômeno de carbonatação, ainda existem muitas lacunas de conhecimento que devem ser preenchidas. Vê-se na união de esforços da comunidade acadêmica um elevado potencial para o esclarecimento do fenômeno, que neste sentido, nos levará de forma rápida à sonhada normalização dos procedimentos de ensaio.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

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.

AFREM/AFPC. ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LA CONSTRUCTION/ASSOCIATION FRANÇAISE DE RECHERCHES ET D'ESSAIS SUR LES MATÉRIEAUX ET LES CONSTRUCTIONS. Essai de carbonatation accéléré – 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.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho**. 2000. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BARY, B.; SELIER, A. Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1859-1872, 2004.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, V. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 23, p. 442-452, 1993.

COELHO, M. A. M. *et al.* Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno. In CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002. 14 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **PrEN 13295**: Carbonation Resistance (English Version). CEN/TC 104/SC 8 N 591, (Revised draft prepared by WG 2 for formal vote), France, Feb. 2000.

CUNHA, A. M. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo: EPUSP, 2001. 13 p. + anexos. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283).

DAL MOLIN, D. C. C.; VIEIRA, F. M. P.; KULAKOWSKI, M. P.; STOLFO, R. M. **Pesquisa para o aprimoramento do emprego da sílica ativa Silmix em cimento e concreto e verificação de desempenho dos cimentos Eldorado**. Porto Alegre; NORIE-CPGEC-UFRGS, 1997. 124 p. (Relatório de pesquisa).

DUPRAT, F.; SELIER, 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^o 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.

HELENE, P. R. L. **Corrosão das armaduras em concreto armado**. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO

CONCRETO, 4., Campinas, 1981. SIMPATCON: QDLV_Campinas, Concrelix, 1981.

_____. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: Pini - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47 p.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p. 489-504, 1987.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** 1995. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** São Paulo, 1995. 112 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação.** 1995. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 744-753, 2006.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar.** 2003. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KOBUKU, M.; NAGATAKI, S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test. In: MALHOTRA, V. M (Ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2 v., v. 1, p. 315-329 (SP-114).

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa.** 1999. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

MEDEIROS, M. H. F. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço.** 2002, 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos.** 1996. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion.** 1992. 394 f. Tesis (doctoral) - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad politecnica de Madrid, Madrid-España, 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

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.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Cement and Concrete Association Report, Jul. 1987.

_____. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. (104-DCC: damage classification of concrete structures – RILEM). **Materials and Structures**, n. 23, p. 230-234, 1990.

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.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 146 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. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendations CPC-18). **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

_____. 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.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete: accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, n. 34, p. 597-606, 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.

SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. del. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, n. 8, p. 949-953, Oct. 2001.

SEIDLER, N. Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios. **1999. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.**

SIERRA, A. **O processo de carbonatação no concreto em função dos tipos de cimento e agregados**. 1996. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1996.

SILVA, V. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation rate. **Durability of Building Materials and Components**, v. 6, 1993.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto com cimento Portland**. 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com sílica ativa**. Porto Alegre, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssilica**. 1991. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação de argamassas e concretos: fatores intervenientes. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1989. p. 118-133.