

Um Estudo sobre a Carbonatação ao Concreto Utilizando Cimentos Brasileiros e suas Implicações no Campo Normativo

SIERRA, ARJUNA

MSc, Eng. Civil, DNER/IPR, Professor Assistente da Fundação Souza Marques.

**DE SOUZA, VICENTE
CUSTÓDIO MOREIRA**

PhD, MSc, Eng. Civil, Professor Titular, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFF, Pesquisador do CNPq.

ABSTRACT

The objective of this work is to study, using accelerated tests, the influence of the type of cement (CPIIF-32, CPIIF-40, CPIII-32 and CPIV-32), the water/cement ratio (0.40, 0.50 and 0.60) and the type of fine aggregates (sand and sand with crusher dust), in the development of carbonation front in cylindrical concrete specimens cured in water for seven days. The carbonation front was determined through a phenolphthalein solution. The results of carbonation front in accelerated tests is an important parameter to the evaluation of the service life in reinforced and prestressed concrete structures.

1. INTRODUÇÃO

A carbonatação é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão das estruturas de concreto armado. Apesar do fenômeno ser estudado há mais de três décadas, os problemas decorrentes continuam acontecendo em larga escala. O uso de concretos mais adequados, de maior resistência e menor porosidade, e de cobrimentos compatíveis com as condições de exposição, previstos em referencial normativo adequado, são elementos efetivos para o controle da carbonatação.

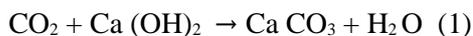
Considerando-se a dificuldade para a realização de ensaios de longa duração, como seria desejável, optou-se pela utilização de ensaios acelerados, efetivados na câmara de carbonatação do Instituto de Pesquisas

Tecnológicas (IPT/SP), conforme dissertação de mestrado (SIERRA, 1996).

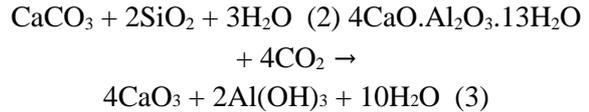
Um dos problemas mais graves e importantes das estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras (KAZMIERCZAK & HELÉNE, 1993). Durante o processo de endurecimento do concreto forma-se uma rede de poros que, em condições adequadas de umidade, é preenchida por uma solução aquosa que proporciona ao concreto elevada alcalinidade (pH entre 12 e 14). Neste pH, e na presença de oxigênio, o aço se recobre de uma capa de óxidos muito aderente, compacta e praticamente invisível, denominada película passivante, que o protege da corrosão. Esta película mantém-se estável em ambientes de alta alcalinidade, enquanto o concreto não vier a sofrer alterações físicas e químicas que despassivem o aço.

A carbonatação modifica a estrutura da pasta do cimento, geralmente aumentando a sua resistência à compressão, provocando pequena retração e, principalmente, diminuindo seu pH, alterando-o de 12,0 para cerca de 8,0. Ao longo do processo, a estabilidade química da camada passivante do aço diminui progressivamente, sendo que valores de pH menores que 11 já são suficientes para despassivar a armadura.

A carbonatação é a reação entre os produtos de hidratação do cimento (HELÉNE et al., 1995), principalmente o Ca(OH)_2 e o CO_2 presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água, segundo a seguinte reação principal:



A ação do CO_2 sobre constituintes do cimento hidratado é, porém, complexa (COUTINHO, 1974), pois não se limita ao Ca(OH)_2 , atacando também outros álcalis do cimento e, a longo prazo, os silicatos e os aluminatos de cálcio hidratados, segundo as seguintes reações, e com a formação de sílica-gel e alumina-gel:



Segundo ALMEIDA (1990) e JOHN & TUDISCO (1993), a velocidade de avanço da carbonatação nos concretos, em termos gerais:

- aumenta com o incremento da relação A/C;
- varia com a natureza, a finura e a dosagem do cimento;
- varia com a duração e as condições de cura, principalmente no que tange à temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 no ar;
- diminui com a redução da porosidade e da permeabilidade, e com o incremento da compactidade da pasta endurecida;
- diminui com o aumento da resistência à compressão;
- aumenta com a presença de fissuras;
- diminui com o incremento da reserva alcalina do cimento (KAZMIERCZAK & HELÉNE, 1993).

Por outro lado, a profundidade de carbonatação poderá, inicialmente, variar linearmente com o tempo, mas, à medida que o processo avança, ele é dificultado, devido à hidratação do cimento. Desta forma, segundo vários autores, o modelo matemático mais utilizado para estimar o desenvolvimento da carbonatação é o seguinte (ALMEIDA, 1990; KAZMIERCZAK & HELÉNE, 1993; WOLF & DAL MOLIN, 1989):

$$e = k \cdot t^{1/2}, \text{ onde} \quad (4)$$

e = profundidade de carbonatação (mm) t = idade do concreto (anos) k = coeficiente de carbonatação ($\text{mm} \cdot \text{ano}^{1/2}$) O coeficiente de carbonatação (k) é uma constante característica de cada concreto (ALMEIDA, 1990), levando em consideração vários parâmetros relativos à resistência à compressão, composição, permeabilidade, umidade relativa do ar e concentração de CO_2 no meio ambiente.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Definição dos traços adotados

Os traços foram dosados, inicialmente, de forma racional pelo Método do INT (CARDOSO, 1976), através de tabelas e ábacos próprios, tendo em vista o ajuste do módulo de finura da mistura em relação ao módulo de finura da curva padrão do INT ($D_{max.}=19\text{mm}$), dentro de uma relação definida de 1: m, tendo em vista o valor adotado para A% (porcentagem de água em relação à mistura de materiais secos).

Após várias tentativas e ajustes experimentais, tendo em vista a natureza dos materiais empregados, chegou-se à decisão de fixar A% = 9% (valor médio).

Portanto, os traços em peso utilizados para as diversas moldagens foram os seguintes:

- a) $x = 0,60 - 1:2,65:1,40:0,50$
- b) $x = 0,50 - 1:2,00:1,06:0,38$
- c) $x = 0,40 - 1:1,36:0,72:0,25$

O traço fixado experimentalmente foi aquele adotado para $x = 0,60$ ou seja 1: 2,65: 1,40: 0,50, sendo os demais ($x = 0,50$ e $0,40$) ajustados de forma a manter-se a mesma proporção existente entre os materiais do primeiro traço.

2.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova (CPs) cilíndricos, nas dimensões 10cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo a mistura obtida através de betoneira elétrica e adensados em mesa vibratória. Os CPs foram desmoldados com 1 (um) dia e curados por 7 (sete) dias, por imersão em água.

O consumo médio de cimento por m^3 , nos diversos traços, foi o seguinte: $x = 0,60 \rightarrow C = 380 \text{ kg/m}^3$; $x = 0,50 \rightarrow C = 470 \text{ kg/m}^3$; $x = 0,40 \rightarrow C = 625 \text{ kg/m}^3$.

O “slump” médio variou de 0 (zero) até 3 (três) cm, sendo este último para o traço de maior fator A/C ($x = 0,60$), e o primeiro para $x = 0,40$.

2.3 Ensaios de carbonatação acelerada

Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT/SP, e abrangeram um total de 30 (trinta) corpos de prova cilíndricos. O serviço

executado foi a determinação da profundidade de carbonatação no concreto, acelerada pela adição de dióxido de carbono (CO_2) ao ar, através de utilização de solução de fenolftaleína. Foram utilizadas uma caixa de madeira hermética provida de dispositivo para controle de vazão de CO_2 e ar, uma prensa hidráulica Mohr & Federhaff com capacidade para 200 tf e um paquímetro Mytutoio, com escala de 150 mm e resolução de 0,1 mm. As condições gerais do ensaio foram as seguintes: concentração de $\text{CO}_2 = 5,0\%$; temperatura ambiente = $24 \pm 4^\circ \text{C}$ e umidade relativa do ar $> 80\%$.

A determinação da profundidade carbonatada foi realizada segundo práticas do IPT/ SP e conforme as recomendações da norma RILEM/CPC-18 (RILEM, Recommendations CPC-18, 1988). Após o prazo pré-determinado, o CP foi rompido no sentido transversal, e a profundidade carbonatada foi medida através da aspensão de uma solução a 1% de fenolftaleína (indicador), que se torna avermelhada na região não carbonatada ($\text{pH} > 9,0$). A medição ocorreu em 4 (quatro) pontos opostos, em formato de uma cruz, tirando-se então a média aritmética das medidas.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Estudo da influência do tipo de agregado miúdo

Da análise dos resultados obtidos observou-se, principalmente em nível qualitativo e comparativo, uma certa influência do tipo de agregado miúdo utilizado (areia ou areia + pó de pedra) para fatores A/C mais baixos ($x = 0,40$), pequena ou quase nula para fatores A/C mais elevados ($x = 0,60$), e relativa para fatores A/C intermediários ($x = 0,50$), basicamente para os cimentos CPIII-32 e CPIV-32.

Além disso, foi ainda constatada uma menor influência do tipo de agregado miúdo para os cimentos com adições, e de maior reserva alcalina (CPIIF-32 e CPIIF-40), do que para o cimento de alto-forno (CPIII-32) e para o cimento pozolânico (CPIV-32), ambos apresentando teor de clínquer reduzido, principalmente o CPIII-32, cujo teor de clínquer

+ sulfato de cálcio pode atingir, pelas normas vigentes, um mínimo de 25% e um máximo de 65% em massa. Por outro lado, tendo em vista observações feitas durante a concretagem dos espécimes, notou-se que os traços que continham areia + pó de pedra apresentaram, de maneira geral, menor trabalhabilidade do que aqueles que utilizavam apenas areia pura, de melhor granulometria.

3.2 Estudo da influência do fator água/cimento (x)

Verifica-se que para $x = 0,60$ muitos traços não apresentaram bons resultados, sendo que o cimento CPIIF-40 apresentou, a 14 dias de exposição, o melhor resultado (5 mm) e o cimento CPIV-32 (pozolânico), o pior resultado dos ensaios, a 60 dias (30 mm), resultado este que já comprometeria as armaduras, podendo assim facilitar o processo de corrosão do material, já que está acima dos cobrimentos usualmente empregados nas peças de concreto armado, tendo em vista as normas correntes.

Para $x = 0,50$, observa-se uma redução na profundidade carbonatada, sendo os melhores resultados os obtidos para os cimentos com adições (CPIIF-32 e CPIIF-40), alcançando a marca de 3 mm (28 dias). O pior resultado obtido foi ainda do cimento pozolânico (CPIV-32), a 60 dias de exposição (20 mm), para o traço com areia + pó de pedra. Este resultado também poderia comprometer a passivação das armaduras em elementos de concreto armado, para os cobrimentos usualmente adotados.

Por outro lado, observa-se também para este fator A/C ($x = 0,50$) que o cimento pozolânico (CPIV-32) apresentou resultados equivalentes e mais próximos àqueles atribuídos ao cimento de alto-forno (CPIII-32), fato este que não ocorreu para $x = 0,60$.

Para $x = 0,40$ verifica-se que a profundidade de carbonatação atinge, para a grande maioria dos traços, valores mínimos. O melhor resultado foi aquele correspondente ao cimento CPIIF-40, que apresentou, a 14 dias, 0 (zero) mm, e a 28 dias de exposição, 2 (dois) mm. Neste fator A/C observa-se, como já foi visto, grande influência da mistura areia + pó de pedra, se comparado aos demais. O pior resultado foi o

do cimento pozolânico (CPIV-32), que apresentou, a 60 dias, 15 (quinze) mm de profundidade carbonatada. Um fato interessante constatado é que, neste fator A/C, o pior resultado obtido, a 28 dias de exposição, foi para o traço que utilizou o cimento de alto forno (CPIII-32), que apresentou 13 (treze) mm de profundidade, contra 12 (doze) mm do cimento CPIV-32. Por outro lado, observou-se ainda uma melhor definição da qualidade de cimento CPIIF-40 em relação ao seu similar, CPIIF-32, fato este que não ocorreu nos fatores A/C anteriores, quando ambos apresentavam resultados praticamente equivalentes.

3.3 Estudo da influência do tipo de cimento

De uma maneira geral pode-se concluir que os cimentos com adições carbonáticas (CPIIF-32 e CPIIF-40) apresentaram os melhores resultados, sendo que o CPIIF-40, geralmente mais fino e de maior resistência à compressão, apresentou resultados excelentes, com um máximo de penetração, a 28 dias de exposição, de 8 (oito) mm, para fator A/C = 0,60, e com um mínimo de 0 (zero) mm de penetração, para fator A/C = 0,40, sendo que o traço que utilizou apenas areia, a 14 dias de exposição, apresentou 0 (zero) mm de penetração, e 1 (um) mm para areia + pó de pedra.

Devido às características da experimentação, entretanto, os cimentos CPIII-32 e CPIV32 foram relativamente prejudicados em relação aos demais. Isto acontece porque eles apresentam reações de hidratação e pega mais lentas do que os outros tipos, necessitando assim de mais tempo para desenvolver melhor as suas potencialidades, sendo que esta foi a principal razão pela qual os traços do cimento CPIV-32 foram ensaiados a 60 (sessenta) dias de exposição, para melhor avaliação. Assim, verificouse que para $x = 0,60$, os valores obtidos a 60 (sessenta) dias foram cerca de 50% maiores do que aqueles encontrados a 28 dias; para $x = 0,50$, cerca de 25% a mais; e para $x = 0,40$, também cerca de 25% maiores, sendo que para este fator A/C (0,40), já apresentava valores aceitáveis, mesmo a 60 dias de exposição (máximo de 15 mm).

Cabe ainda lembrar que, segundo GUIRGUIS (1987), reportando resultados colhidos por outros autores, comparando ensaios acelerados e de longa duração, uma semana (7 dias) de exposição na câmara acelerada de carbonatação (4% de CO₂ em volume), equivaleria a aproximadamente 2 anos e meio de exposição natural, em climas temperados.

4. CONSIDERAÇÕES NO CAMPO NORMATIVO

Várias considerações podem ser levantadas, tais como aquelas que serão expostas a seguir:

1) Inicialmente, cabe assinalar que as normas vigentes determinam para cobrimento das armaduras (vide norma ABNT NBR-6118), valores independentes de quaisquer considerações sobre o tipo e a natureza dos materiais empregados no concreto estrutural, tal como o cimento utilizado, além de outras variáveis.

Assim, observando-se os resultados encontrados nos ensaios, verifica-se que o conceito técnico de cobrimento, tal como preconizado na NBR-6118, é bastante relativo e dependerá fundamentalmente do traço adotado, do tipo de cimento e do fck da estrutura, dentre outros parâmetros. Então, para o cimento CPIIF-32, por exemplo, chegou-se a uma penetração máxima de 8 mm, para 28 dias de exposição no ensaio acelerado (cerca de 12 anos de exposição natural), A/C = 0,60 e areia + pó-de-pedra, enquanto que para o cimento CPIV-32, essa penetração foi de 20 mm, em condições equivalentes, e para o CPIII-32, de 14 mm.

2) Para reforçar estas observações, cabe lembrar o trabalho de JOHN & TUDISCO (1993) sobre o assunto, reportando pesquisas de HELÉNE (1993), que estabelece ser o cobrimento das armaduras função do fck do concreto estrutural, das adições presentes no cimento, da vida útil de projeto, do diâmetro da armadura e do diâmetro máximo do agregado gráudo. Outros autores também apresentam estudos sobre o uso de películas protetoras à carbonatação no concreto armado, principalmente adotado para cimentos com elevado teor de adições, para evitar que as

armaduras sejam precocemente despassivadas (UEMOTO et al., 1995; OLIVEIRA & HELÉNE, 1991).

3) Um outro aspecto interessante é o conceito de que, para fatores A/C mais baixos, a penetração da frente de carbonatação seria menor do que aquela obtida para fatores A/C mais elevados. Sobre este ponto, pode-se assinalar que, para 28 dias de exposição na câmara acelerada (12 anos), traços com fator A/C = 0,60 dos cimentos CPIIF-32 e CPIIF-40 tiveram desempenho igual ou melhor a traços dos cimentos CPIII-32 e CPIV-32, que foram moldados com fator A/C = 0,40 e 0,50, mesmo utilizando apenas a areia como agregado miúdo. Tais fatos sugerem que o tipo de cimento empregado seria mais importante do que o fator A/C adotado, para a evolução da carbonatação.

4) No tocante ao conceito de consumo de cimento por m³, que sempre foi um parâmetro indicador da qualidade e durabilidade dos concretos, inclusive para diversos organismos internacionais, como por exemplo o ACI, verificou-se que mesmo para consumos médios elevados de cimento (c = 470 kg/m³ para A/C = 0,50 e c = 625 kg/m³ para A/C = 0,40), dependendo do tipo de traço e do cimento adotados, os resultados obtidos pelos ensaios não foram satisfatórios (vide item anterior), revelando assim a necessidade de melhor conceituação para este parâmetro, talvez levando-se em consideração o tipo de cimento e de agregados utilizados.

5) Um outro fato observado é o relativo à influência da mistura areia + pó-de-pedra em alguns traços. Assim, a utilização dessa mistura deverá se restringir, preferencialmente, àqueles cimentos que apresentem maior reserva alcalina e a menor quantidade de adições, principalmente para fatores A/C mais reduzidos. Talvez o emprego de aditivos plastificantes minimizasse este efeito observado nas experimentações, caso fosse resultante de uma menor trabalhabilidade da mistura.

6) Desta forma, os cimentos CPIII-32 e CPIV-32 só deverão ser empregados em estruturas submetidas a atmosferas urbanas, poluídas e agressivas, mediante determinadas

precauções, principalmente no tocante a redução do fator A/C e a não utilização da mistura areia + pó-de-pedra, somente possível e pouco influenciada pelo fator A/C para os cimentos de elevada alcalinidade (CPIIF-32 e CPIIF-40). Caso haja absoluta necessidade de emprego dos cimentos citados inicialmente, sugere-se a utilização de cobrimentos maiores do que aqueles preconizados na NBR-6118, ou até mesmo o emprego de películas protetoras (UEMOTO et al., 1995).

7) Sobre este assunto, concorda-se com ALMEIDA (1990), reportando em sua tese que, segundo alguns autores, o emprego de ensaios acelerados de carbonatação apresenta os seguintes inconvenientes:

- na avaliação de produtos pozolânicos, os ensaios acelerados não são alterados pelos possíveis efeitos benéficos de redução de diâmetro ou de bloqueamento dos poros, atribuídos aos materiais pozolânicos;

- devido à curta duração do ensaio, praticamente não se altera o grau de hidratação do ligante, ao contrário do que se passa na realidade, e que contribui, ao longo do tempo, para reduzir a velocidade de progressão da carbonatação

- as estruturas reais geralmente estão sujeitas, ao longo do tempo, a variações de temperatura, umidade relativa do ar e concentração de CO₂, impossíveis de serem previstas pelos ensaios acelerados.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista as experiências realizadas e as considerações anteriores, sugerimos a realização de:

- revisão das normas existentes sobre projeto estrutural, com a devida consideração da realidade e adequação dos materiais empregados;

- ensaios complementares de correlação de resultados obtidos na câmara acelerada com resultados provenientes da exposição natural, inclusive com espécimes colocados ao ar livre, para avaliação da influência das intempéries, semelhante aos procedimentos adotados por outros autores;

- ensaios com espécimes de concreto armado (ou protendido), com vários níveis de cobrimento, talvez combinando-se com ensaios de corrosão acelerada, para verificação do potencial de corrosão de cada traço adotado;

- revisão de conceitos e metodologias adotadas na avaliação de estruturas de concreto armado (e protendido), principalmente no tocante à estimativa da vida útil residual e a sua interdependência com o tipo e a natureza dos materiais empregados (cimento, agregados, aditivos, etc.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR-6118 Projeto e dimensionamento de estruturas de concreto armado**, Rio de Janeiro, 1986.
- ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade, composição e características**, Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 740 p, 1990
- CARDOSO, M. F. S. **Dosagem de Concreto**, Instituto de Pesquisas Rodoviárias - DNER, Rio de Janeiro, RJ, Rio de Janeiro, 53 p, 1976.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v 2, Lisboa, Portugal, 400-407, 1974.
- GUIRGUIS, S. A **Basis for Determining Minimum Cover Requirement for Durability, Concrete Durability**, ACI, v 1, USA, 447-467, 1987.
- HELÉNE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da USP.
- HELÉNE, P. R. L.; MITIDIERI FILHO, C. V. e THOMAZ, E. Influência do tipo de cimento e da relação A/C na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto, Anais, **Reunião Anual do IBRACON**, São Paulo, SP, Brasil, 169-182, 1995.
- JOHN, V. M. e TUDISCO, M. Durabilidade e carbonatação do concreto armado na revisão da NBR-6118, Anais, **Seminário Sobre Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto**, Porto Alegre, RS, Brasil, 118-133, 1993.
- KAZMIERCZAK, C. S. e HELÉNE, P. R. L. Estimativa e determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto, Anais, **Seminário Sobre Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto**, Porto Alegre, RS, Brasil, 49-61, 1993.
- OLIVEIRA, P. S. F. e HELÉNE, P. R. L. Proteção e Manutenção das Estruturas de Concreto. **Revista Engenharia**, São Paulo, n. 485, p. 11-26, nov./dez. 1991.
- RILEM, Recommendations, **CPC-18, Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth, Materials and Structures**, v. 21, Switzerland, p. 453-455, 1988.
- SIERRA, A **O processo de carbonatação no concreto em função dos tipos de cimento e agregados**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, RJ, 1996.
- UEMOTO, K. L.; AGOPYAN, V. e JOHN, V. M. Redução da Carbonatação de Estruturas de Concreto Armado através de Películas Protetoras, **Reunião Anual do Ibracon**, 37, 1995, Anais... São Paulo, IBRACON, 1995, p. 063-075.

WOLF, J. e DAL MOLIN, D. Carbonatação de argamassas e concretos - fatores intervenientes, Anais, **Simpósio Sobre Patologia das Edificações - Prevenção e Recuperação**, Porto Alegre, RS, Brasil, 118-133, 1989. ◆