



ENTAC2006

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

RELAÇÃO ENTRE A CARBONATAÇÃO E A ABSORTIVIDADE EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO EM BRASÍLIA

Chenia R. Figueiredo (1), Antonio A. Nepomuceno (2)

(1) Departamento de Tecnologia – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília, Brasília, Brasil – e-mail: chenia@unb.br

(2) Departamento de Tecnologia - Faculdade de Engenharia Civil - Universidade de Brasília, Brasília, Brasil – e-mail: nepomuceno@unb.br

RESUMO

Proposta: Brasília, capital do Brasil, foi considerada Patrimônio Cultural da Humanidade em 1989, pela sua importância do ponto de vista arquitetônico e urbanístico. Isso a coloca dentro de exigências de preservação de suas principais edificações tanto do ponto de vista formal como estético, necessitando de mais conhecimentos sobre a interação dessas edificações com o meio ambiente. O presente estudo é uma contribuição ao entendimento do fenômeno da carbonatação de algumas edificações de concreto armado de diversas idades construídas ao longo dos 48 anos de Brasília. **Metodologia de pesquisa/abordagens:** medida da profundidade de carbonatação, extração de testemunhos, caracterização do concreto do ponto de vista das resistências mecânicas e da porosidade. **Resultados:** existe uma boa correlação entre a profundidade de carbonatação e a absorvividade do concreto. **Contribuições/originalidade:** medida da profundidade de carbonatação em edifícios existentes para se avaliar a influência das condições climáticas de Brasília no avanço da carbonatação e na durabilidade das estruturas.

Palavras-chave: carbonatação do concreto, absorvividade, avaliação in loco.

ABSTRACT

Propose: Brasília, capital of Brazil, was considered in 1989 Cultural Heritage of the Humanity, for its importance to the architectural and urban planning. Because of that their main constructions are protected, demanding larger preservation cares as much of the point of view of the durability as aesthetic, needing more knowledge of their interactions with the environment, mainly with gas CO₂ due the carbonation of concrete. The present study is a contribution to the understanding of the phenomenon of the carbonation and an approach for the modeling of the progress of carbonation front, in reinforced structures with several built ages, in Brasília, along the last 48 years. **Methods:** the carbonation depths were measured and the concrete was characterized by the porosity. **Findings:** the results show that a good correlation exists between the carbonation coefficient and the sortivity of the concrete. **Originality/value:** several columns of six buildings were analyzed in the central area of the city, us which the carbonation depths were measured and the concrete was characterized by the porosity and durability.

Keywords: carbonation, concrete, sortivity, evaluation in loco.

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da produção do cimento Portland, em 1824, às primeiras obras em concreto armado, em 1894, chegando à utilização do concreto aparente na construção civil, em 1911, observa-se a utilização cada vez mais expressiva do concreto, caracterizada pela grande mobilidade de formas possíveis e pela facilidade de utilização (Silva, 1995). Efetivamente, foi após a segunda guerra mundial que se conseguiu fabricar o concreto com uma composição suficientemente regular e uniforme, graças ao avanço na tecnologia desse material, de modo que a sua superfície fosse a expressão visível da sua textura homogênea.

A qualidade efetiva do concreto superficial, do cobrimento à armadura, depende da adequabilidade da fôrma, do aditivo desmoldante e, preponderantemente, da cura dessas superfícies. A durabilidade da estrutura de concreto de forma geral é determinada pela composição ou traço do concreto, pela compactação ou adensamento, pela cura e pelo cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras (NBR 6118, 2003).

Portanto, a vida útil desejada para a estrutura pode ser alcançada através de uma combinação adequada e inteligente desses fatores, ou seja, ao empregar um concreto de melhor qualidade, é possível reduzir o cobrimento mantendo a mesma vida útil de projeto, e vice-versa. Admitindo que o adensamento e a cura serão e deverão ser bem executados em qualquer circunstância, fica um certo grau de liberdade entre a escolha da resistência (qualidade) do concreto e a espessura do cobrimento.

Brasília, inaugurada em 1960, contou em sua construção com homens inovadores da arquitetura e da engenharia no Brasil, como Lúcio Costa, Oscar Niemeyer, Joaquim Cardoso e Mário Villa Verde, considerados intérpretes entusiastas das perspectivas de aplicação que o concreto oferecia à sua capacidade inventiva. A determinação desenvolvimentista do governo de Juscelino Kubitschek produziu fatos eloquentes no terreno da urbanização e do urbanismo em Brasília, sendo Oscar Niemeyer o responsável pelos projetos de todos os edifícios públicos da capital, onde o uso do concreto foi bastante explorado. Impulsionado pelo modernismo, pela mobilidade e facilidade de uso, o concreto é o material mais utilizado nas obras locais, presente em obras de arte, residências, prédios residenciais e comerciais, órgãos públicos e monumentos.

Brasília continua sendo uma cidade em construção e a maior parte de suas edificações são executadas em concreto armado. Entretanto, mesmo sendo uma cidade relativamente nova, constatam-se inúmeros casos de problemas patológicos nas edificações existentes, decorrentes da interação do concreto com o meio ambiente.

Em Brasília foi realizado um levantamento das principais manifestações patológicas existentes nas edificações (Nince, 1996). Foram avaliados 401 edifícios localizados na região Centro-Oeste do Brasil, sendo a maioria das patologias decorrentes da execução, seguida de planejamento/projeto. Especificamente em Brasília, Nince (1996) apresenta os dados coletados em relação às manifestações patológicas, analisados em um universo de 200 edifícios. Verificou-se que a corrosão é a manifestação patológica que se torna notória em 30% dos casos. O somatório apresentado é superior a 100% devido à superposição de manifestações.

Sabe-se que o principal fator de deterioração das estruturas de concreto armado ocorre em função da interação do concreto com os agentes agressivos existentes no meio ambiente. Atualmente, a durabilidade das estruturas está sendo estudada com base no ingresso e transporte de agentes agressivos. Estes agentes agressivos penetram no concreto através dos poros da pasta de cimento ou pelas microfissuras.

O CO₂ presente na atmosfera reage com alguns componentes do concreto provocando mudanças nas propriedades químicas e físicas do sistema. A ação principal do CO₂ se dá pela penetração do mesmo

no concreto devido à porosidade do material, ocasionando sua reação com os componentes alcalinos do cimento, denominada carbonatação.

No caso da cidade de Brasília, por ser Patrimônio Cultural da Humanidade que necessita ser preservado, a obtenção de dados e a compreensão do fenômeno da carbonatação aumenta de importância. A região tem características ambientais peculiares como a umidade relativa média em torno de 60% (Inmet, 2005) por um longo período do ano. Essa é a condição que propicia maior velocidade de carbonatação (Tuutti, 1982; Parrott, 1991).

Os resultados obtidos em laboratório em condições aceleradas diferem em parte das condições reais do elemento estrutural porque avaliam o comportamento de corpos-de-prova que são preparados, curados e expostos de uma maneira diferente das condições reais, condições estas que não são facilmente reproduzidas em laboratório. Isso justifica o presente trabalho com o levantamento feito *in situ* em seis edificações em Brasília com o objetivo de verificar a profundidade de carbonatação e correlacioná-la com outras características do concreto.

2. METODOLOGIA

2.1 Escolha das edificações

A medida da profundidade carbonatada foi obtida em estruturas de concreto armado, expostas nas condições ambientais de Brasília, através de medidas obtidas em edifícios existentes. Tendo como critério de seleção dos edifícios o tempo de exposição, foram escolhidos seis edificações, com idades entre 8 e 35 anos, executadas em concreto com resistência à compressão média de 27 MPa. Dentre as edificações avaliadas, procurou-se selecionar edifícios que representassem o concreto utilizado na maioria das edificações convencionais em Brasília.

Foram avaliadas estruturas de concreto armado aparente, em dois edifícios executados pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital – NOVACAP, três pela Prefeitura da Universidade de Brasília e um edifício de uma Cooperativa, na cidade de Brasília. Os edifícios estudados foram: Edifício Águas Claras (AC) – 8 anos; Edifício Colina (CK) – 10 anos; Edifício Faculdade de Saúde (FS) – 22 anos; Edifício Faculdade de Estudos Sociais Aplicados (FA) – 25 anos; Edifício Novacap (NC) – 33 anos e Edifício no Eixo Monumental (EM) – 35 anos. Os ensaios foram realizados em pilares localizados em ambiente externo protegido da chuva e externo não protegido da chuva. Definiu-se pela avaliação de pilares principalmente pela facilidade de fixação do equipamento de extração de testemunhos.

Foram avaliados 6 pilares em cada edificação e extraídos dois corpos de prova de 7 x 15 cm (aproximadamente) de cada pilar, com comprimento variando em função da dimensão dos pilares, pois as extrações foram realizadas atravessando toda a largura do mesmo. As amostras foram extraídas com aproximadamente 1 m e 1,5 m de altura em relação à base, sendo o primeiro corpo-de-prova utilizado para determinação da resistência à compressão e, logo após o rompimento, para medida da profundidade carbonatada, e o segundo foi empregado no ensaio de absorvividade. Os resultados desses ensaios, bem como a relação da profundidade carbonatada com os demais parâmetros avaliados fazem parte de um estudo mais amplo (Figueiredo, 2004). A medida da profundidade carbonatada também foi obtida no furo logo após a extração do corpo de prova.

2.2 Ensaios realizados

2.2.1 Medida da profundidade carbonatada

Para medida da profundidade de carbonatação nos pilares utilizou-se como indicador de pH, a fenolftaleína a 1% dissolvida em solução 50-50 % de álcool etílico e água. Esta solução é incolor em pH inferior a 9,3 tornando-se vermelho-carmim para valores superiores. Isto permite identificar se as armaduras já estão em regiões de baixo pH e, portanto despassivadas, com possibilidade de se iniciar um processo de corrosão caso haja a presença de umidade (Tuutti, 1982).

A determinação da profundidade de carbonatação foi feita sobre uma porção de concreto recém-fraturada e também sobre o orifício deixado pela extração do testemunho de acordo com a recomendação da RILEM CPC 18 (1988).

Foram obtidos, em média, 16 leituras por pilar, em cada edificação, totalizando 96 leituras da profundidade carbonatada no concreto recém-fraturado. A medida da profundidade carbonatada também foi obtida nos testemunhos extraídos, após rompimento no ensaio de resistência à compressão. Pôde-se observar uma grande semelhança entre os resultados medidos nos testemunhos extraídos em relação aos valores medidos no furo após a extração.

2.2.2 Absortividade

A absorvidade, de acordo com o proposto por Hall (1989), foi determinada com as medidas feitas nos momentos iniciais do ensaio de absorção capilar. Os ensaios foram feitos utilizando seis testemunhos de cada edificação, extraídos das estruturas avaliadas. A execução do ensaio para determinação da absorção de água é descrita na norma brasileira NBR 9779 (1995), adaptada no presente trabalho. As amostras foram mantidas em estufa a 50º C até constância de massa, ao invés dos 105 ºC prescritos pela norma brasileira, para evitar microfissuras nos testemunhos. O ensaio determina o acréscimo de massa em relação à massa inicial, para os corpos-de-prova em contato com uma lâmina d'água de 5 ± 1 mm. A massa foi determinada a cada 30 minutos durante as três primeiras horas e a cada 1 hora no período seguinte, até completar seis horas e a partir daí, a cada 24, 48 e 72 horas. A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm² e é calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água.

Como os testemunhos foram extraídos atravessando toda a espessura do pilar, o ensaio de absorção capilar foi realizado na superfície externa que corresponde à mesma superfície na qual foi realizado o ensaio de permeabilidade ao ar.

3. RESULTADOS

São apresentados os resultados da profundidade carbonatada e da absorvidade de seis edificações, com idades entre 8 e 35 anos, em pilares localizados em ambiente externo protegido da chuva. São também as principais características das condições climáticas de Brasília.

3.1 Profundidade de carbonatação

A profundidade carbonatada das estruturas avaliadas é apresentada na Tabela 1. A profundidade carbonatada média encontra-se no intervalo de 11 a 35 mm, correspondente às edificações AC e FA, respectivamente, em pilares localizados em ambiente externo protegido da chuva.

Tabela 1 – Profundidade carbonatada das edificações avaliadas, localizadas em ambiente externo protegido da chuva.

Profundidade carbonatada (mm)	AC	CK	FA	FS	NC	EM
Mínima	8	15	28	14	14	26
Máxima	15	24	42	24	33	42
Média	11	19	35	19	20	32

Analisando pela profundidade carbonatada média, observa-se que em menos de 15 anos as edificações AC e CK atingiram 11 e 19 mm, respectivamente. Esses valores aumentam para edificações com maiores idades, como a FA, com profundidade carbonatada de 35 mm em menos de 25 anos e 32 mm para a edificação EM, com aproximadamente 35 anos.

A edificação AC apresentou um baixo coeficiente de carbonatação, entretanto esse resultado é discutido por Figueiredo¹⁰ ao associá-lo aos demais ensaios realizados, e se observou que o concreto desta edificação apresenta, aparentemente, características bem distintas às demais edificações avaliadas.

Segundo os resultados apresentados por Figueiredo (2004), as edificações avaliadas possuem resistência à compressão variando entre 22 e 31 MPa, condições de exposição climáticas semelhantes, mas apresentam variações consideráveis na porosidade.

3.2 Absortividade

Vários estudos mostram o avanço da frente de carbonatação dependente principalmente da relação água-cimento (Parrott, 1987; Vesikari, 1988; Smolczyk, 1969). Nesta pesquisa, como os ensaios foram realizados em testemunhos extraídos das edificações, onde não se conhece a relação água/cimento, utilizou-se o ensaio de absorção para se obter informações sobre a porosidade do concreto e correlacioná-la com a carbonatação.

A variação da absorção capilar nos instantes iniciais do ensaio ao longo tempo fornece elementos para o cálculo da absorvatividade definida como a declividade da reta no gráfico absorção capilar versus raiz quadrada do tempo (Figura 1), conforme proposto por Hall (1989). Os valores da absorvatividade, que indicam indiretamente a velocidade do fluxo de água na camada superficial do concreto nos instantes iniciais, são apresentados na figura 2.

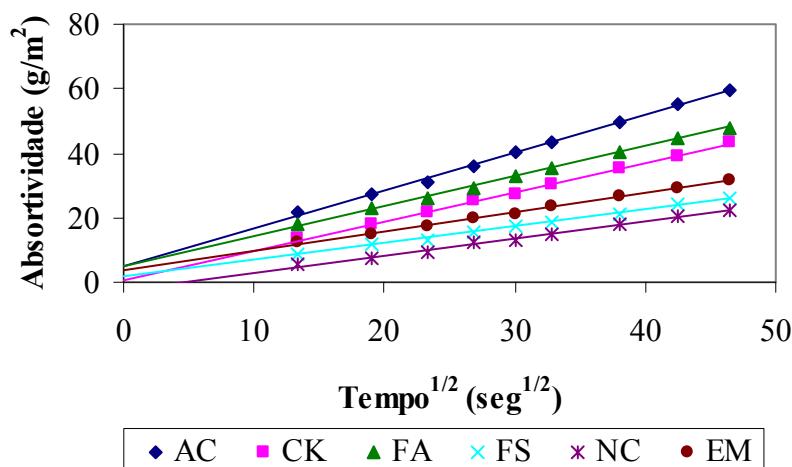


Figura 1 – Absorção de água versus raiz quadrada do tempo nos momentos iniciais de penetração da água no concreto das edificações investigadas.

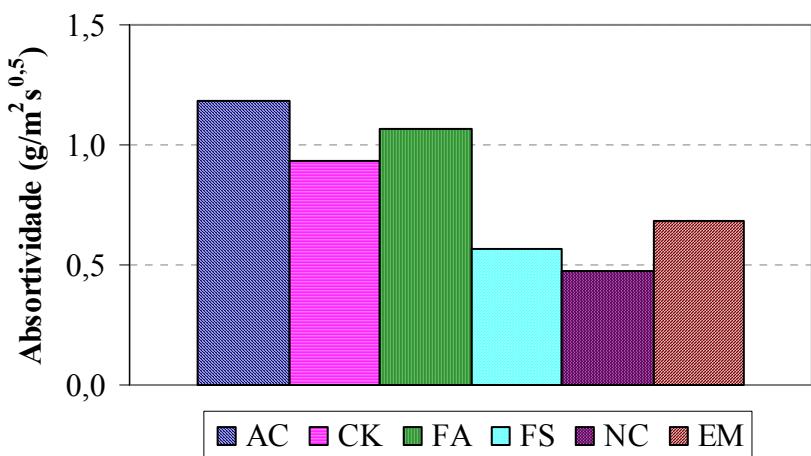


Figura 2 – Valores de absorptividade das edificações investigadas.

Pode-se observar que o concreto da edificação AC, com 8 anos de construção, apresenta a maior absorptividade com um valor igual a $1,2 \text{ g}/\text{m}^2 \text{s}^{0,5}$. A menor absorptividade ocorre na edificação NC, edificação com 33 anos, igual a $0,47 \text{ g}/\text{m}^2 \text{s}^{0,5}$. Esse parâmetro é importante por dar informações sobre a porosidade da superfície do concreto frente à penetração de água. Deve-se lembrar que a absorção capilar foi medida na superfície do testemunho correspondente à superfície do pilar que já estava carbonatada.

A absorptividade do concreto é uma característica que também podem ser obtida de forma simples, resultando em uma variável de interesse para a modelagem do coeficiente de carbonatação. A figura 3 representa o coeficiente de carbonatação em função da absorptividade das edificações avaliadas, bem como a linha de tendência obtida. O coeficiente de determinação da linha de tendência obtida (r^2) é de 0,9538. No entanto, nesta linha de tendência não foi incluída a edificação AC, por vários aspectos. Esta edificação com apenas 8 anos de idade, foi executada, após algumas mudanças no processo de produção de cimentos e concreto consumidos na região. Os cimentos produzidos na região de Brasília passaram a ser mais finos para atender as exigências de mercado com relação a maiores resistências iniciais, além de contar com a possibilidade de utilização de adições na produção de concretos, que, em alguns casos, reduzem a reserva alcalina do concreto, prática freqüente entre algumas produtoras de concreto. Em ensaios de carbonatação acelerada com testemunhos extraídos das edificações, eliminadas as áreas já carbonatadas, mostraram que o concreto dessa edificação apresentou maior coeficiente de carbonatação (Figueiredo, 2004). Estas observações levaram a desconsiderar esta edificação da correlação.

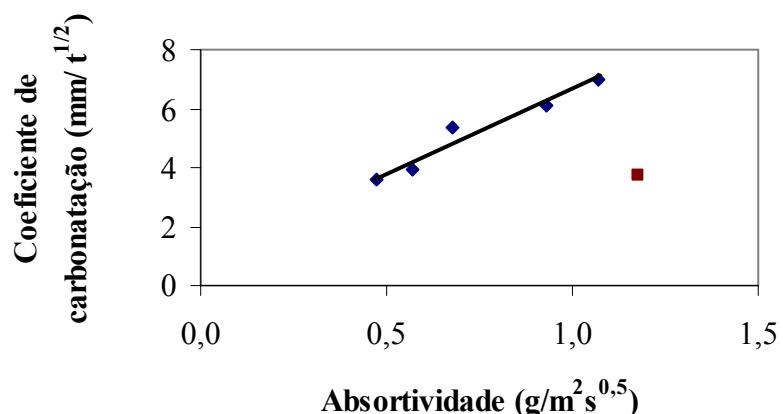


Figura 3 – Coeficiente de carbonatação em função da absorptividade das edificações avaliadas.

Os resultados mostram uma ótima correlação entre o coeficiente de carbonatação e a absorvividade, que mede a velocidade do fluxo de água e a velocidade de carbonatação, o que ocorre pelo fato desses dois parâmetros estarem diretamente relacionados à camada superficial do concreto. Como os testemunhos utilizados no ensaio foram extraídos das obras, representam as mesmas características do concreto após lançamento, como cura e condições de exposição, comprovando a sua relação com a carbonatação.

A figura 4 representa graficamente a variação do coeficiente de carbonatação para as edificações avaliadas, localizadas em ambiente externo protegido da chuva, em condições climáticas de Brasília, em função da absorvividade para uma faixa de 0 a 2 g/m²s^{0,5}. É importante ressaltar que os dados aqui apresentados referem-se a concretos com as características das edificações avaliadas, não representando, portanto, edificações com características muito diferentes. Além disso, como a absorvividade depende dos procedimentos de ensaio, especialmente a temperatura e tempo de secagem das amostras, a correlação aqui apresentada só é válida para este parâmetro determinado nas mesmas condições de ensaio.

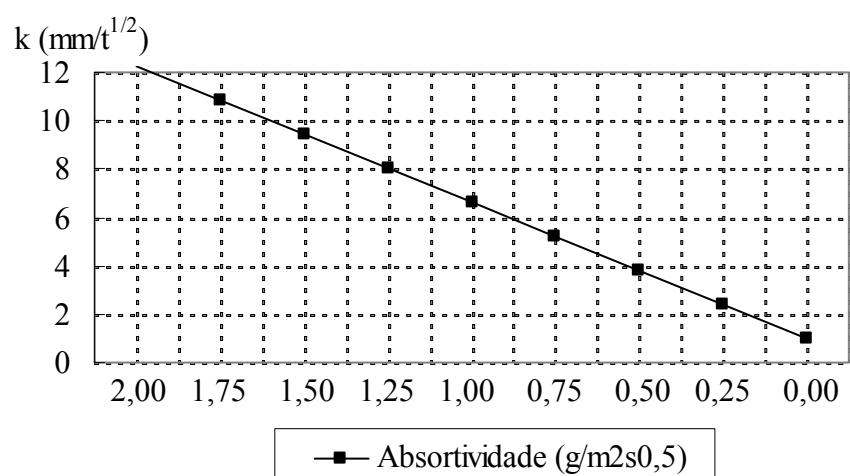


Figura 4 – Variação do coeficiente de carbonatação em função da absorvividade do concreto para as edificações avaliadas, em pilares localizados em ambiente externo protegido da chuva

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as condições de exposição das edificações avaliadas, pode-se concluir que os resultados mostraram uma boa correlação entre a velocidade de carbonatação e a absorvividade. Isto provavelmente ocorre pelo fato desses dois parâmetros estarem diretamente relacionados às características da camada superficial do concreto.

Os dados apresentados para as edificações avaliadas no presente trabalho não representam o comportamento das construções mais recentes em Brasília nas quais tenham sido utilizados consumos e tipos de cimento muito diferentes, o que foi corroborado pelo comportamento da edificação com oito anos de idade, onde outras variáveis analisadas ficaram fora das correlações estudadas (Figueiredo, 2004).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:** Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares.** Tese de Doutorado, Publicação E.TD-003A/2004, Depto. de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004, 218p.
- HALL, C. **Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review.** Magazine of Concrete Research, 1989; 41: 51-61.
- NINCE, A. A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste.** Dissertação de Mestrado, Brasília, UnB, 1996.
- PARROTT, L. J. **A Review of Carbonation in Reinforced Concrete.** Cement and Concrete Association, Report C/1-0987, July, 1987.
- PARROTT, L. J.; HONG, C. Z. **Some Factors Influence Air Permeation Measurements in Cover Concrete.** Materials and Structures, 1991.
- RILEM CPC 18 – **Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth.** Materials and Structures, v. 21, 1988
- SILVA, T. J. **Predicción de la Vida Útil de Forjados Unidireccionales de Hormigón Mediante Modelos Matemáticos de Deterioro.** Tesis Doctoral, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- SMOLCZYK HG. **Written Discussion.** Proc. of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, Vol. III, Tokio, 1969.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- VESIKARI, E. **Service Life Prediction of Concrete Structures with Regard to Corrosion of Reinforcement.** Technical Research Centre of Finland, Report nº 553, Finlandia, 1988.