

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia de Construção Civil**

ISSN 0103-9830  
**BT/PCC/283**

---

**DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS DE  
CONCRETO POR AÇÃO DA CARBONATAÇÃO**

---

**Ana Caria Quintas da Cunha**  
**Paulo R.L.Helene**

São Paulo – 2001

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Construção Civil  
Boletim Técnico - Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Antônio Marcos de Aguirra Massola  
Vice-Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko  
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. João da Rocha Lima Junior

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alex Abiko  
Prof. Dr. Francisco Cardoso  
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.  
Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves  
Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo  
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico  
Prof. Dr. Alex Abiko

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Este texto faz parte da dissertação de mestrado de mesmo título, que se encontra à disposição com os autores ou na biblioteca da Engenharia Civil.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Cunha, Ana Caria Quintas da

Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação / A.C.Q. da Cunha, P.R.L. Helene. -- São Paulo : EPUSP, 2001.

13p. + anexos. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283)

1. Estruturas de concreto - Durabilidade 2. Despassivação por carbonatação I. Helene, Paulo Roberto do Lago II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série

ISBN 0103-9830

CDU 624.012.4  
620.193.46

## DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS DE CONCRETO POR AÇÃO DA CARBONATAÇÃO

Cunha, Ana Carla Quintas da<sup>1</sup> e Helene, Paulo R. L.<sup>2</sup>

- (1) Eng<sup>a</sup> Civil, aluna de Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica de São Paulo PCC.USP.
- (2) Prof. Titular, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica PCC.USP.

### RESUMO

As estruturas de concreto armado quando sujeitas à corrosão de armaduras por ação da carbonatação têm sua vida útil reduzida, com consequências graves na estabilidade global, na segurança, na estética e no crescimento significativo dos custos de manutenção.

Foram estudados os efeitos de três tipos de cimento: Portland Comum com Adição CP I-S, Portland de Alto-Forno CP III e Portland Pozolânico CP IV, utilizados no concreto com vistas a medir o tempo necessário à despassivação das armaduras inseridas em corpos-de-prova especialmente desenhados e produzidos para serem submetidos a uma exposição acelerada em câmara de carbonatação.

Como variáveis dependentes foram escolhidas a corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ), o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e a resistividade elétrica iônica ( $\rho_{corr}$ ) do concreto superficial de cobrimento das armaduras, através de técnicas eletroquímicas tipo resistência de polarização.

Concluiu-se que os concretos com relações água/cimento variáveis de 0,35, 0,50 e 0,65, e consistências seca, plástica e fluida, confeccionados com o cimento Portland Comum CP I-S apresentaram a melhor resistência à profundidade de carbonatação, o maior tempo para despassivar a armadura e ainda as menores correntes de corrosão após a despassivação, ou seja, durante o período de propagação da corrosão.

Os concretos produzidos com o cimento Portland de Alto-Forno CP III foram os primeiros a permitir a despassivação das armaduras, assim como, deram origem às mais elevadas correntes de corrosão.

## CONCRETE STEEL BARS - DEPASSIVATION BY CARBONATION

### ABSTRACT

Carbonation can reduce dramatically the service life of reinforced concrete structures. The consequences can affect the ultimate global stability, the ultimate strength, the aesthetic aspects and increase a lot the maintenance costs.

Was performed the influence of three types of Portland cements; Ordinary Portland cement ABNT CP I-S (ASTM type I), Portland Blastfurnace Slag cement ABNT CP III (ASTM type IS) and Portland Pozzolan cement ABNT CP IV (ASTM type IP). The research target was measured the period of time to get steel depassivation of the rebars inside the specific designed reinforced specimens under accelerated carbonation test conditions of exposure.

Dependent variables was density of corrosion current ( $i_{corr}$ ), the corrosion potential ( $E_{corr}$ ) and the ionic electrical resistivity ( $\rho_{corr}$ ) of the concrete cover using the electrochemical techniques like polarization resistance method.

Concrete made by three different water cement ratios: 0,35, 0,50 and 0,65 and three different fresh workability; dry earth, plastic and fluid, using Ordinary Portland cement ABNT CP I-S (ASTM type I) shows the better behavior against carbonation, minimum depth carbonation and the larger period of time to get depassivation. Also these concrete shows the minimum density of corrosion current after depassivation, what means, the minimum corrosion current during the propagation period.

The concrete made by Portland Blastfurnace Slag cement ABNT CP III (ASTM type IS) shows the minimum period of time to get depassivation and shows the highest corrosion current during the propagation period of time.

### INTRODUÇÃO

A tradicional concepção do concreto armado como um material de grande durabilidade e resistência têm sido invariavelmente questionada devido ao surgimento de um número cada vez maior de manifestações patológicas, destacando-se a corrosão das armaduras de concreto como a de maior gravidade (KURTIS & MEHTA, 1997). Esta deterioração inoportuna e indesejada, eleva o custo de manutenção das estruturas e reduz a sua vida útil, com conseqüências sociais desastrosas. Sendo assim, o estudo sistemático do problema a partir de suas manifestações características, permite um conhecimento mais aprofundado de suas causas, e subsidia com informações os trabalhos de reparo e manutenção das estruturas de modo a minimizar a incidência total de problemas (CEB, 1993; BASHEER et al., 1994).

As armaduras das estruturas de concreto armado em sua procedência, se encontram passivas em decorrência da elevada alcalinidade do extrato aquoso do concreto, que possui um pH da ordem de 12 a 13, de acordo com HELENE (1981) e segundo LONGUET; BURGOEN & ZELLWER (1973) entre 12,7 e 13,8. A alta alcalinidade favorece a formação de um filme de óxidos submicroscópico passivante, compacto, resistente e aderente sobre a superfície da armadura que, inviabiliza o desenvolvimento da corrosão das armaduras no concreto armado (GOUDA, 1966; HELENE, 1981; HELENE, 1993).

A carbonatação no concreto que é um dos principais agentes iniciadores da corrosão, provoca alteração na condição de equilíbrio da alta alcalinidade, havendo assim, redução generalizada do pH para valores menores que 10,5, ocasionando a susceptibilidade das armaduras (quebra da instabilidade química do filme de óxidos passivante) no que tange a corrosão das armaduras (HELENE, 1981, PAGE, 1988; PARROT, 1990).

O cobrimento da armadura é uma ação isolante, ou de barreira, sendo exercida pelo concreto interpondo-se entre o meio corrosivo e a armadura, principalmente em se tratando de um concreto bem dosado, muito pouco permeável, compacto e apresentando uma espessura adequada de cobrimento (HELENE, 1993). Essa proteção baseia-se no impedimento da formação de células eletroquímicas, através da proteção física (estanqueidade) e proteção química (reserva alcalina).

A durabilidade portanto depende da espessura, uniformidade e estanqueidade que o concreto de cobrimento deva proporcionar ao longo do tempo às referidas armaduras e a apreciável reserva alcalina responsável pela passivação das armaduras (HELENE, 1993).

Os pesquisadores HAQUE & KAWAMURA (1992) relatam em seus estudos, que a principal causa da corrosão das armaduras em concretos é a perda da eficiência do concreto de cobrimento, que deve proporcionar proteção necessária contra a penetração de agentes agressivos que venham a desencadear a despassivação das armaduras.

No que diz respeito a identificação (natureza e extensão) do fenômeno da corrosão dos elementos metálicos no concreto causado pelo fenômeno da carbonatação, destacam-se, entre outras, as técnicas visuais e as técnicas eletroquímicas. As técnicas eletroquímicas são as mais atraentes por sua sensibilidade, rapidez e por serem de caráter não destrutivo e pelo simples fato de que muitas delas, podem ser utilizadas "in situ" muito antes que as deteriorações alcancem patamares alarmantes de magnitudes consideráveis, além de poderem fornecer avaliações qualitativas e quantitativas tanto sobre o estado superficial do aço, quanto sobre as taxas de corrosão (MONTEIRO, 1996; BRITO, 1997; NEPOMUCENO; BAUER & LINS, 1999).

Entre as técnicas visuais mais conhecidas se encontra a análise da frente de carbonatação do concreto por meio do emprego de substâncias químicas, que em contato com a solução alcalina do concreto, rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas a partir de um determinado pH da solução. As substâncias mais utilizadas pelo meio técnico são a fenolftaleína e a timolftaleína que permitem conhecer a mudança do pH entre 8,3 e 10 e entre 9,3 e 10,5, respectivamente. O emprego de indicadores químicos apresentam duas desvantagens como sendo, o caráter destrutivo do ensaio e os resultados obtidos só são qualitativos no que tange ao teor de carbonatos presentes.

O objetivo principal desta pesquisa experimental é observar qualitativamente e quantitativamente a influência de certas adições ao cimento, no desempenho do concreto de cobrimento das armaduras, como agente protetor contra a despassivação por carbonatação. E como objetivos complementares pretende-se apresentar uma visão atualizada do fenômeno da corrosão das armaduras por carbonatação.

A avaliação da despassivação das armaduras de aço foi realizada periodicamente durante todo ensaio através da determinação dos parâmetros eletroquímicos intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ), potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), e resistividade elétrica iônica ( $\rho_{corr}$ ) do concreto superficial de cobrimento das armaduras. Foi utilizado o equipamento GECOR6, que emprega a técnica de resistência de polarização.

## **1 CORROSÃO DAS ARMADURAS DE CONCRETO**

Segundo HELENE (1993) a corrosão pode ser definida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica, ou por combinação destas. Como ações físicas características podem-se citar os fenômenos de cavitação e erosão; como ações químicas as reações de expansão e de lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento Portland em argamassa e concretos e; como ação eletroquímica típica a maioria dos processos corrosivo de metais em meios aquosos (HELENE, 1993).

## 1.1 MECANISMO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS DE CONCRETO

Como o potencial do processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão com o pH, pode-se estabelecer uma relação em função do pH que são representadas graficamente pelo diagrama de POURBAIX (1976); (PAGE, 1988) na Fig. I-1.

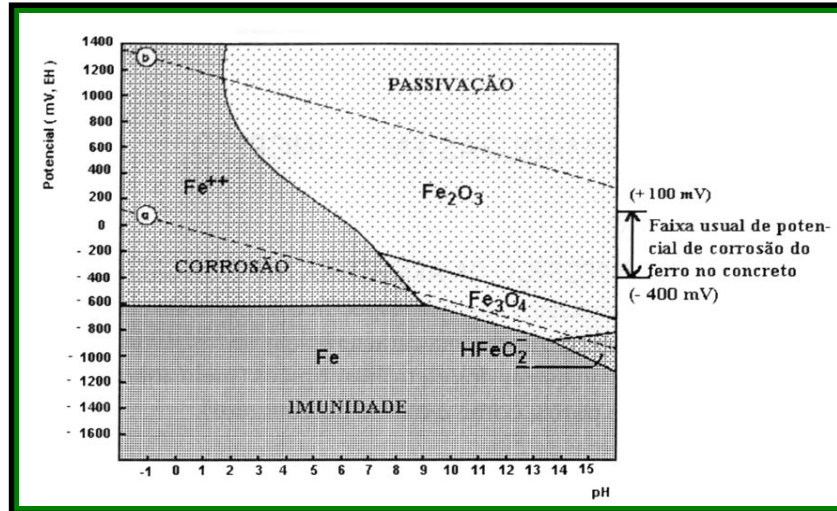


FIGURA I-1. Diagrama simplificado de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial  $\times$  pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O, para 25° C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade (POURBAIX, 1976).

Para uma ordem de grandeza do pH da solução intersticial aquosa do concreto de 12,5 a 13,5 (meio altamente alcalino do concreto, em condições normais, que fornece às armaduras um alto grau de proteção contra corrosão) e para uma faixa usual de potencial de corrosão no concreto da ordem de +100 mV a -400 mV em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, as reações de eletrodo verificadas no ferro são de passivação. Tomando-se como modelo este tipo de diagrama de potencial de equilíbrio-pH se torna possível indicar se um processo particular de reação corrosiva é termodinamicamente favorável ou não.

HELENE (1986) apresenta que, para que a corrosão das armaduras no interior do concreto se desenvolva são necessárias as seguintes condições:

**Deve existir um eletrólito** - Meio onde ocorre pilhas ou células de corrosão de natureza eletroquímica, que irá conduzir os íons, gerando uma corrente de natureza iônica e, também, para dissolver o oxigênio. O eletrólito, no concreto, é constituído basicamente pela solução intersticial aquosa que contém íons em solução (podendo ser fraco, ou seja, com poucos íons, ou forte, com muitos íons).

**Deve existir uma diferença de potencial** - (ddp) - entre dois pontos aleatórios da armadura, seja pela diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão do concreto e/ou no aço, impurezas no metal, heterogeneidades inerentes ao concreto, pela carbonatação ou pela presença de íons.

**Deve existir oxigênio** - Que regulará todas as reações de corrosão, dissolvido na água presente nos poros do concreto.

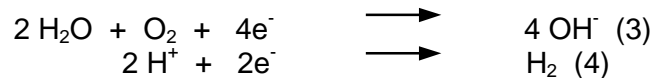
A presença de agentes agressivos no eletrólito que podem acelerar a corrosão como por exemplo os íons sulfetos (S<sup>2-</sup>), os íons cloretos (Cl<sup>-</sup>), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e outros, é a quarta condição que pode existir, que influencia fortemente o início e a velocidade do processo corrosivo, pois atuam diretamente nas reações necessárias ao desenvolvimento do processo, porque acentuam a ddp e porque facilitam a dissolução da camada de passivação.

A corrosão se desenvolve com a presença das seguintes reações:

Nas zonas anódicas (regiões corroídas) - Onde ocorrem as reações principais de dissolução do metal (oxidação) segundo ROGERS (1967). O processo anódico ocorre na superfície do metal.



Nas zonas catódicas (regiões não corroídas) - Onde ocorrem reações de redução de oxigênio (caso da armadura de concreto). O processo catódico ocorre na interface entre o metal e o eletrólito e depende da disponibilidade de oxigênio dissolvido e do pH da interface metal -eletrólito. As reações de maior interesse são, segundo MIRANDA & BASÍLIO (1987).



A Fig. I-2 elucida sinteticamente todo o mecanismo da corrosão da armadura no concreto, no período de propagação do fenômeno.

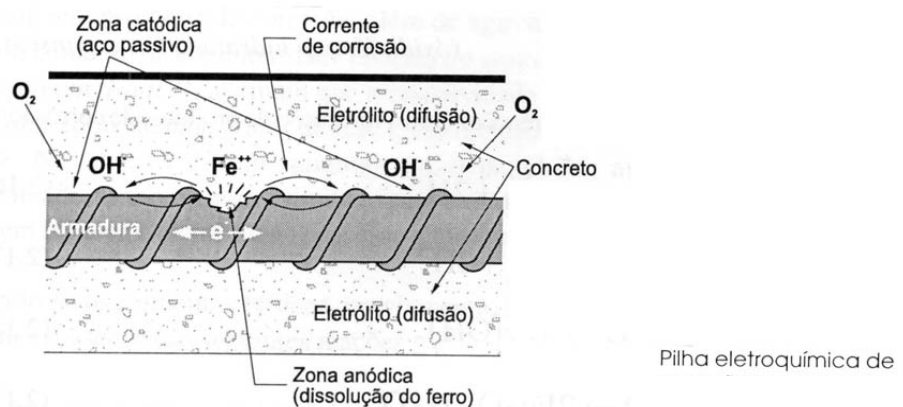


FIGURA I-2. Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado

Os produtos oriundos ou decorrentes da corrosão criam expansões nas armaduras, causando danos ao concreto. Esses prejuízos observados em concretos pela fissuração, produzem uma variação na distribuição de tensão sobre a seção e causam um deslocamento angular no sentido do comprimento da barra rígida e uma redução na ligação armadura/concreto devido à perda de confinamento.

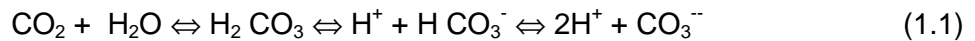
## 1.2 INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA CORROSÃO DAS ARMADURAS

A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio com o líquido intersticial existente nos poros do concreto, que se encontra saturado por hidróxidos de cálcio provenientes da hidratação do cimento, e também, com outros compostos hidratados do cimento em equilíbrio com o líquido intersticial. O ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) são os principais constituintes ácidos do meio (SCHRODER & SMOLCZYC, 1968).

O processo ocorre por difusão gasosa do CO<sub>2</sub> (existente na atmosfera) na fase aquosa dos poros do concreto e pela posterior reação química do CO<sub>2</sub> dissolvido com o hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] e outros constituintes sólidos carbonatáveis do

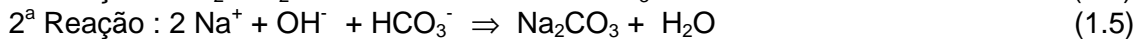
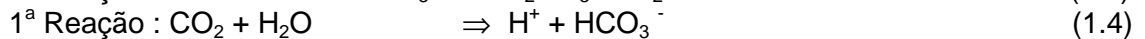
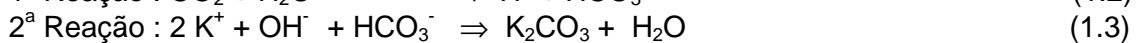
concreto, como os álcalis do cimento [(NaOH) e (KOH)] em menores quantidades no cimento e, a longo prazo, os silicatos e aluminatos (HELENE, 1981; HELENE, 1993; BALEN & GEMERT, 1994).

Segundo FORRESTER (1976) para que a reação de carbonatação se produza naturalmente, é necessário que o anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>) seja solubilizado, conforme apresentado na Equação (1.1).

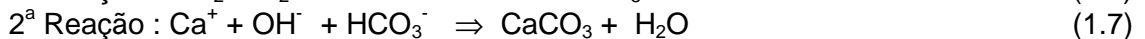
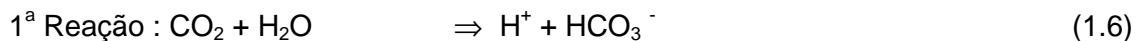


As equações simplificadas dos compostos básicos carbonatáveis do concretos são:

Reação de carbonatação para os álcalis do cimento mais solúveis; hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), encontrado em quantidades muito menores no cimento:



Reação de carbonatação para o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>:



A profundidade ou espessura de carbonatação, dá-se a partir da superfície e avança progressivamente para o interior do concreto, formando uma “frente de carbonatação”, que separa duas zonas de pH muito distintas, uma com pH próximo a 13 e outra com pH próximo a 8, geralmente expressa em mm ou em cm e, que na maioria das vezes, trata-se de um valor médio, nem sempre muito uniforme em concretos contendo agregados graúdos com dimensão máxima característica acima de 19 mm (HELENE, 1993).

Danos causados pela corrosão das armaduras por carbonatação, manifestam-se sob a forma de expansão (em decorrência dos produtos finais de corrosão que possuem um volume maior que a armadura original), fissuração, destacamentos do cobrimento, perda da aderência e redução significativa de seção da armadura, subtraindo o comportamento da vida em serviço da estrutura para qual foi projetada, elevando assim os custos de manutenção e reparo (HELENE, 1986).

A umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub>. A difusão de CO<sub>2</sub> na fase líquida é aproximadamente 10<sup>4</sup> vezes mais lenta que na fase gasosa, mas a presença de água é fundamental para a reação. Devido o concreto ser um material microporoso, a penetração de gás carbônico será governada pela forma da estrutura dos poros e se os poros do concreto são preenchidos ou não por água (VÉNUAT & ALEXANDRE, 1969; BAKKER, 1988). Se os poros se encontrarem secos (sem água), o CO<sub>2</sub> se difundirá no interior deles, mas a carbonatação não ocorrerá pela falta de água, se os poros estiverem preenchidos com água, não haverá quase carbonatação, devido à baixa taxa de difusão do CO<sub>2</sub> na água e se os poros estiverem apenas parcialmente preenchidos com água, que é normalmente o caso próprio à superfície do concreto, a frente de carbonatação avança até profundidades onde os poros do concreto apresentem essa condição favorável (situação efetivamente deletéria sob o ponto de vista da despassivação da armadura), devido a dois fatores, água e possibilidade de difusão de CO<sub>2</sub> (VÉNUAT & ALEXANDRE, 1969; BAKKER, 1988).

A máxima carbonatação ocorre quando a umidade relativa é mantida entre 60% e 85%, fora dessa faixa, a carbonatação é praticamente insignificante (HELENE, 1981).



## 2 EXPERIMENTO

### 2.1 PLANEJAMENTO GERAL DO EXPERIMENTO

O planejamento geral do experimento foi direcionado e organizado de forma a avaliar o comportamento de concretos confeccionados com três tipos genéricos de cimentos disponíveis no mercado nacional quanto à proteção oferecida as armaduras quando submetidos ao fenômeno da carbonatação acelerada, procurando identificar os momentos precisos da despassivação das armaduras inseridas nos corpos-de-prova de concreto, assim como, a posterior evolução da corrosão nestas armaduras.

Na investigação do momento em que se principia a fase de iniciação e evolução da corrosão, utilizou-se o equipamento GECOR6 que emprega a técnica de Resistência de Polarização ( $R_p$ ), que permite determinar as intensidades de corrosão instantâneas das armaduras usadas como sensores embutidos nos corpos-de-prova, assim como, os seus potenciais de corrosão e as resistividades elétricas iônicas do concreto superficial de cobrimento das armaduras dos corpos-de-prova.

A averiguação do perfil de comportamento de cada tipo de cimento foi baseado no exame simultâneo do concreto de cobrimento (eficiência de proteção por barreira química e/ou física) e na observância da evolução dos comportamentos das armaduras colocadas nos corpos-de-prova de concreto, quando submetidos a ensaios acelerados de corrosão por efeito da carbonatação.

### 2.2 VARIÁVEIS ANALISADAS

Foram estabelecidas as seguintes variáveis no planejamento do experimento, como sendo:

#### A) Variáveis independentes (Fixas)

- cura úmida em câmara úmida (28 dias, temperatura de 23° C e UR superior a 98%)
- natureza e tipo de agregado graúdo (brita N° 1 de natureza granítica, dimensão máxima característica de 19 mm)
- natureza e tipo de agregado miúdo (areia média de natureza quartzosa, dimensão máxima característica de 4,8 mm)
- armadura (com dimensões de 12,51 mm de diâmetro por 380 mm de comprimento)

#### B) Variáveis independentes

- 3 cimentos (CP I-S, CP III E CP IV)
- 3 relações a/c (0,35, 0,50 e 0,65)
- 4 consistências: (seca, medianamente plástica, plástica e fluida)

No planejamento do experimento, foram adotadas quatro derivações dos intervalos de consistência adotados pela ABNT — Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone/NBR 7223 (ABNT,1992):

**consistência seca**, com abatimento do tronco de cone de  $(20 \pm 5)$  mm;

**consistência medianamente plástica**, com abatimento do tronco de cone de  $(50 \pm 10)$  mm;

**consistência plástica**, com abatimento do tronco de cone de  $(80 \pm 10)$  mm e;

**consistência fluida**, com abatimento do tronco de cone de  $(120 \pm 20)$  mm.

Estas derivações foram sugeridas e empregadas para que não ocorressem sobreposições de tolerâncias, ou seja, não seria interessante que as consistências apresentassem dubiedade e transitoriedade nos intervalos.

O ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) em concretos foi útil na detecção de variações na uniformidade de misturas com determinadas proporções nominais.

- espessura de cobrimento da armadura (1,0 cm e 2,5 cm)

- idade de ensaio (7 a 55 dias)

### C) Variáveis dependentes

- corrente de corrosão ( $i_{corr}$ )
- potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )
- resistividade elétrica

## 2.3 CORPOS-DE-PROVA

As moldagens dos corpos-de-prova destinados aos ensaios acelerados de corrosão foram executadas conforme — Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto - Procedimento/NBR 5738 (ABNT, 1994).

As moldagens dos corpos-de-prova dos ensaios acelerados de corrosão foram executadas com o objetivo de se obter o maior grau possível de homogeneidade e compacidade em concretos e, principalmente, exatidão rigorosa de forma, dimensões e posicionamento das barras. A forma utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios acelerados de corrosão foi confeccionada de aço, de forma prismática, de dimensões (27,90 X 15,20 X 11,40) cm, empregando três barras de 12,51 mm de diâmetro e 380 mm de comprimento, planejadamente dispostas, com cobrimentos definidos de 1,0 cm e de 2,5 cm, em uma matriz de concreto, conforme elucidado pela Fig. II-1 no ANEXO A. Logo após o procedimento de moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara úmida e desmoldados com 48 horas (durante esse período os corpos-de-prova foram cobertos com plásticos molhados) e mantidos em cura até a idade predefinida pelo experimento.

## 2.4 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO POR EFEITO DA CARBONATAÇÃO

Após cumpridas todas as etapas preliminares ao ensaio acelerado de corrosão por efeito da carbonatação, da confecção dos corpos-de-prova de concreto até o término do procedimento de condicionamento, os mesmos foram submetidos ao processo de capeamento. As faces laterais dos corpos-de-prova foram revestidos com uma mistura de cera de abelha e breu, funcionando com uma barreira física, de modo a se obter apenas duas frentes de carbonatação, sendo elas: as faces superiores e as faces inferiores dos corpos-de-prova, onde os cobrimentos já se encontravam estabelecidos na metodologia (corpos-de-prova com espessuras de cobrimento de 1,0 cm e corpos-de-prova com espessuras de cobrimento de 2,5 cm). Essa pintura foi efetuada para que não ocorressem interferências no ensaio de corrosão, pois se deixassem expostas as faces laterais dos corpos-de-prova, as frentes de carbonatação nas laterais, alcançariam as armaduras primeiramente, despассивando-as, causando danos irreparáveis ao ensaio de corrosão.

O procedimento de condicionamento foi executado logo após a realização da cura, resumiu-se em exposição dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório por um período de 15 dias para que forçosamente ocorresse a estabilização ou equilíbrio das condições de umidade entre o meio e a porosidade dos corpos-de-prova de concreto (condições relativamente padronizadas de umidade nos poros) em função de valores de umidade relativa existentes, entre 65% e 70%, e temperatura variando em torno de 23 °C a 24°C.

Dando seguimento ao ensaio, os corpos-de-prova foram dispostos na câmara de carbonatação para o início do processo de carbonatação acelerada.

Na presente pesquisa, o avanço da frente de carbonatação e por consequência a corrosão (fase de iniciação e fase de propagação da corrosão) foram avaliados através de medidas de grandezas de intensidade de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), potencial (mV) e resistividade elétrica superficial do concreto de cobrimento ( $\text{k}\Omega.\text{cm}$ ).

A duração da fase de iniciação da corrosão foi determinada pela velocidade com que a região de cobrimento total foi alterada á nível de neutralização. Assim, pode-se dizer que a duração da fase de iniciação correspondeu ao tempo gasto para a frente de carbonatação alcançasse a armadura.

O procedimento baseou-se em utilizar uma câmara de carbonatação, em que foram introduzidos teores de CO<sub>2</sub> superiores aos encontrados na atmosfera.

O CO<sub>2</sub> oriundo do cilindro foi injetado na câmara de carbonatação em sua parte inferior, na concentração de  $\cong 100\%$ . Como a saída do CO<sub>2</sub> é posicionada na parte superior da câmara, o mesmo se deslocou por entre os corpos-de-prova.

A câmara de carbonatação permaneceu hermeticamente fechada durante todo o ensaio, de modo a não haver saída de CO<sub>2</sub> a não ser pelo orifício de saída, exetutando-se, quando se necessitou retirar o corpo-de-prova específico para as leituras das medidas eletroquímicas efetuadas pelo aparelho GECOR6. O controle de umidade relativa da câmara de carbonatação foi feita manualmente, sendo que a umidade determinada oscilou entre de 65% e 70%.

No caso da despassivação por carbonatação, deve-se considerar: a reserva alcalina (tipo e composição do cimento); estrutura física do concreto (relação com os mecanismos de transporte, porosidade, absorção capilar, etc...) e o grau de saturação dos poros.

O procedimento de ensaio consistiu na aplicação de fluxos intermitentes de CO<sub>2</sub> que apresentaram a duração de 10 minutos com o objetivo de se ter a renovação do ar para fluxo contínuo. No desenvolvimento do ensaio, foram estabelecidos fluxos de 30 em 30 minutos até a despassivação de todas as armaduras, e logo a seguir, oito fluxos diários (de 3 em 3 horas).

A despassivação da armadura foi caracterizada pelo aumento da intensidade de corrosão ultrapassando a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , chamada zona de passivação. A frequência de medição das variáveis eletroquímicas foi efetuada de duas em duas horas (após o quarto fluxo de 30 minutos em 30 minutos) para as séries A1, A2, B1 e B2, e de quatro em quatro horas para as séries C1, C2, D1 e D2 (após o oitavo fluxo de 30 minutos em 30 minutos).

O tempo necessário para o GECOR6 realizar uma leitura eletroquímica variou entre 2 a 5 minutos.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

#### **3.1 PROPORCIONAMENTO DAS SÉRIES**

A Tabela III-1 no ANEXO A apresenta o proporcionamento das séries empregadas no experimento.

#### **3.2 RESULTADOS DO ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO**

Os resultados estabelecidos nas Tabelas III-2 a III-17 no ANEXO A são referentes ao ensaio acelerado de corrosão para as séries específicas (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2) confeccionadas com o cimento tipo CP I-S, nas Tabelas III-18 a III-33 são os resultados para as séries específicas (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2) confeccionadas com o cimento tipo CP IV e nas Tabelas III-34 a III-49 são os resultados para as séries específicas (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2) confeccionadas com o cimento tipo CP III.

#### **3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

O acompanhamento dos valores de  $i_{\text{corr}}$  ao longo do ensaio acelerado de corrosão obtidos por meio de leituras efetuadas pelo equipamento GECOR6, permitiu avaliar a cinética do processo de corrosão de cada armadura, planejadamente dispostas, nos

corpos-de-prova, do estudo em questão.

As Tabelas III-2 a III-17, referentes as séries confeccionadas com o cimento CP I-S, mostram que, nas maiorias das vezes, salvo algumas exceções, os menores valores de  $i_{corr}$ , em relação as séries confeccionadas com o cimento CP IV (Tabelas III-18 a III-33) seguidas pelas as séries confeccionadas com o cimento CP III (Tabelas III-34 a III-49). Já as séries confeccionadas com o cimento CP III, mostram os maiores valores de  $i_{corr}$  que, chegam a atingir  $1,102 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para a 1ª barra,  $1,235 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para a 2ª barra,  $1,245 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para a 3ª barra após 48 horas de ensaio, em relação ao traço A1, em corpos-de-prova com espessura de cobrimento de 1,0 cm.

Em todos os casos, o desempenho das séries que empregam o cimento CP III sempre apresenta valores de  $i_{corr}$  superiores, em relação as séries equivalentes, ao final do ensaio de corrosão, às mesmas idades (horas).

Além do tipo de cimento empregado, a velocidade de carbonatação e a de corrosão também é governada pela relação água/cimento utilizada no traço, visto que, ao se aumentar a relação água/cimento, o desenvolvimento da corrosão processa-se cada vez mais intenso (valores  $i_{corr}$  atingem patamares bem mais elevados quando comparados com relações água/cimento inferiores), em virtude dos poros capilares se encontrarem mais transponíveis à carbonatação (suscetíveis à penetração do  $\text{CO}_2$ ) e; pela espessura de cobrimento da armadura, pois, a distância entre a superfície de concreto de cobrimento até a superfície da armadura, funciona como barreira física (interconexão capilar) e como barreira química (reserva alcalina) capaz de governar o tempo para que a frente de carbonatação alcance as armaduras do corpo-de-prova.

Sendo assim, se torna fácil explicar que as séries que empregam a relação água/cimento 0,65, o desenvolvimento da corrosão apresenta-se mais intenso, quando comparadas as séries que empregam as relações água/cimento 0,50 e 0,35; e para as séries que empregam espessuras de cobrimento de 1,0 cm, observa-se menores períodos de tempo decorridos para a frente de carbonatação alcançasse a armadura, em relação as séries que empregam as espessuras de cobrimento de 2,5 cm.

As comparações quanto a evolução de  $i_{corr}$ , para diferentes consumos de cimento, observa-se que as séries com menores consumos de cimento apresentam a duração da fase de iniciação diminuída.

Comparativamente evidencia-se o efeito negativo do cimento que contém adição de escória de alto forno, quanto ao processo de carbonatação, uma vez que as séries que empregam este cimento apresentam sempre níveis de corrosão superiores e, a despassivação e evolução da corrosão ocorrem mais rapidamente à idades menores, seguido do cimento CP IV que também contém adições que substituem à uma parcela de clínquer.

Com relação à evolução do potencial de corrosão, deve-se apresentar algumas particularidades como: a) diminuição do potencial com o início do processo de carbonatação observados durante todo o ensaio acelerado; b) em geral, os valores de potencial são superiores (mais nobres) para as séries que empregam o cimento CP I - S, sendo que para as séries que empregam o cimento CP III, os valores de potencial são inferiores (mais negativos), sendo esse comportamento evidenciado para todos os traços empregados no experimento.

Com a relação água/cimento 0,65, para o traço A1, com espessura de cobrimento de 1,0 cm para o cimento CP III, verifica-se uma redução rápida dos valores de potencial de corrosão sendo que estes atingiram valores muito negativos ( $624,9 \text{ mV}$  - 3ª barra), ao final do ensaio.

As séries que empregam consumos menores alcançaram valores de potencial mais negativos ao final do ensaio, quando comparados com as séries que empregam consumos superiores.

Quanto a evolução do potencial para as séries que empregam corpos-de-prova com espessura de cobertura 1,0 cm, evidencia-se um comportamento similar as séries que empregam corpos-de-prova com espessura de cobertura de 2,5 cm.

Para as séries que empregam os cimentos CP I-S e CP IV, os valores de resistividade se apresentam superiores as séries que empregam o cimento CP III.

### **Conclusões**

Dentre as metodologias desenvolvidas e utilizadas no programa experimental, deve ser ressaltado a boa resposta das técnicas eletroquímicas como instrumento de monitorização da corrosão das armaduras. O emprego da técnica de resistência de polarização através do equipamento GECOR6 se apresentou satisfatório, uma vez que o objetivo da pesquisa foi alcançado com êxito. Pela aplicação da metodologia, o processo é coerente, ou seja, variações de  $i_{corr}$  são acompanhadas por variações de  $E_{corr}$  respectivamente ( $i_{corr}$  baixo, potencial mais positivo).

Avaliando-se a carbonatação através do indicador de deterioração intensidade de corrosão, constata-se em todos os casos um desempenho inferior para as séries que empregam o cimento CP III ao se comparar com outras séries equivalentes. Face à estrutura similar, não se destaca efeito benéfico oriundo de refinamento da porosidade, com relação aos ensaios acelerados de corrosão.

Em todos os casos o desempenho das séries que empregam o cimento CP III se apresenta inferior às séries equivalentes, apresentando sempre valores de  $i_{corr}$  superiores ao final do ensaio de corrosão, e uma significativa diminuição da duração da fase de iniciação da corrosão.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BALEN, K. V.; GEMERT, D. V. Modelling lime mortar carbonation **Materials and Structures**. vol. 27, p. 393 - 398, 1994.
- BAKKER, F. M. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (ed). **Corrosion of steel in concrete**, RILEM Technical Committee 60 - CSC. London, Chapman e Hall, 1988.
- BASHEER, P. A. M. et al. An interaction Model for Causes of Deterioration and Permeability of Concrete. Concrete Technology: Past, Present and Future. V. Mohan Malhotra Symposium. **Proceedings**. 1994. p. 213-225.
- BRITO, N. E. D. **Avaliação do grau de corrosão das armaduras em estruturas com concreto carbonatado**. São Paulo, 1997. 215p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990 Design Code**, 1993, (Bulletin D'Information , N° 203).
- FORRESTER, J. A. Measurement of Carbonation, RILEM **Colloquium on Carbonation of Concrete**. s.1, s. ed., 1976. Paper 2.1.
- GOUDA, V. K. Anodic Polarization Measurements of Corrosion and Corrosion Inhibition of Steel in Concrete. **British Corrosion Journal**. Vol. 1, 1966, p. 138-142.
- HAQUE, M. N.; KAWAMURA, M. Carbonation and chloride induced corrosion of reinforcement in fly ash concretes. **ACI Materials Journal**. vol.89, N° 01, p. 41 - 48, January - February, 1992.
- HELENE, P. R. L. Corrosão das Armaduras em Concreto Armado. In: Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto, 4., Campinas, 1981. SIMPATCON: **Anais**. Campinas, Concrelix, 1981.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão das Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo, IPT, PINI, 1986.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- KURTIS, K. E; MEHTA, P.K. "A Critical Review of deterioration of Concrete Due to Corrosion of Reinforcing Steel" **Proceedings of the International Conference on "Durability of Concrete"**. ACI SP 170, Editor: V. M. Malhotra, p. 535-554, 1997.
- LONGUET, P.; BURGOEN, E. L. ; ZELWER, A. La Phase Liquide du Ciment Hydraté. **Rev. Mater. Constr.** N° 676, 1973, p. 35-42.
- MIRANDA, T. R. V.; BASÍLIO, F. A. Alguns aspectos eletroquímicos da corrosão de armaduras em concretos. **Informativo INT**. v.19, n° 39, pp. 21-24, maio/ago., 1987.
- MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob à ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. Brasília, 1996. 138p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília.
- NEPOMUCENO, A.; BAUER, E.; LINS, V. F. C. Avaliação do emprego de técnicas eletroquímicas no estudo da corrosão em armaduras de concreto. **V Congresso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, VII Congreso de Control de Calidad**. p. 1257-1264, 1999.
- PAGE, C. L. Basic principles of corrosion. In: P. Schiessl, ed. **Corrosion of steel in concrete**. RILEM Technical Committee 60 - CSC. London, Chapman & Hall, 1988.

PARROT, L. J. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. **Materials and Structures**. vol. 23, p. 230 - 234, 1990.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Pergamin Press, NACE, Cebelcor, 1976.

ROGERS, T. H. **Marine corrosion**. London, s.ed., 1967, p.293.

SCHRODER, F. & SMOLCZYK, H. G. Carbonation and protection against steel corrosion. In: **Fifth Int. Symp. Chemistry of Cement**. Tokyo, 1968. Tokyo, 1968, vol. 4, p. 188 - 198.

VÉNUAT, M.; ALEXANDRE, J. De la Carbonation du Béton. França, **CERILM**, Publicação n° 195, 1969, 30 p.

## BOLETINS TÉCNICOS PUBLICADOS

- BT/PCC/264 Indicadores de Salubridade Ambiental em Favelas Localizadas em Áreas de Proteção aos Mananciais: O caso da favela Jardim Floresta. MARCO ANTONIO PLÁCIDO DE ALMEIDA, ALEX KENYA ABIKO. 28p.
- BT/PCC/265 Difusão de Cloretos e a Influência do Grau de Saturação do Concreto: Ensaio em laboratório e medição de obra em uso. ANDRÉ T. C. GUIMARÃES, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 19p.
- BT/PCC/266 Análise Econômica de Empreendimentos de Longo Horizonte de Maturação: Taxa de Retorno Compensada. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 15p.
- BT/PCC/267 Arbitragem de Valor de Hotéis. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 55p.
- BT/PCC/268 Diretrizes para Produção de Contrapisos Estanques. EDUARDO HENRIQUE PINHEIRO DE GODOY, MERCIA M. S. BOTTURA DE BARROS. 36p.
- BT/PCC/269 Produtividade da mão-de-obra na execução de alvenaria: detecção e quantificação de fatores influenciadores. LUÍS OTÁVIO COCITO DE ARAÚJO, UBIRACI ESPINELLI LEMES DE SOUZA. 24p
- BT/PCC/270 Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. ELIANE PEREIRA DE LIMA, PAULO R. L. HELENE. 13p.
- BT/PCC/271 Análise Econômica de Empreendimentos de Longo Horizonte de Maturação - Indicadores Avançados para Análise da Qualidade do Investimento. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 24p.
- BT/PCC/272 Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. OSWALDO CASCUDO, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 20p.
- BT/PCC/273 A provisão habitacional e a análise de seu produto. LEANDRO DE OLIVEIRA COELHO. EDMUNDO DE WERNA MAGALHÃES. 32p.
- BT/PCC/274 Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho. CASSIANA APARECIDA AUGUSTO KALINTZIS. SELMO CHAPIRA KUPERMAN. 24p.
- BT/PCC/275 Avaliação da sensibilidade do ensaio de penetração de água sob pressão e de um índice de permeabilidade para o concreto. CRISTIANO AUGUSTO GUIMARÃES FEITOSA. JOÃO GASPAS DJANIKIAN. 17p.
- BT/PCC/276 Contribuição ao estudo da fadiga do concreto. AVELINO APARECIDO DE PÁDUA CREPALDI. JOÃO GASPAS DJANIKIAN. 15p.
- BT/PCC/277 Desempenho de revestimentos de argamassa com entulho reciclado. LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA. SÍLVIA MARIA DE SOUZA SELMO. 12p.
- BT/PCC/278 O tratamento da expansão urbana na proteção aos mananciais – O Caso da Região Metropolitana de São Paulo. RENATO ARNALDO TAGNIN, EDMUNDO DE WERNA MAGALHÃES. 25p.
- BT/PCC/279 Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. SÉRGIO CIRELLI ÂNGULO, VANDERLEY MOACYR JOHN. 16p.
- BT/PCC/280 Gestão de materiais em empresas construtoras de edifícios: gestão dos fluxos de informações. SOFÍA LILIANNE VILLAGARCÍA ZEGARRA, FRANCISCO FERREIRA CARDOSO. 22p.
- BT/PCC/281 Características geométricas relevantes para controle da qualidade dos produtos moldados de concreto armado. SASQUIA HIZURO OBATA, UBIRACI ESPINELLI LEMES DE SOUZA. 16p
- BT/PCC/282 Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto. ROSELE CORREIA DE LIMA , PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE, MARYANGELA GEIMBA LIMA. 12p.
- BT/PCC/283 Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação. ANA CARIA QUINTAS DA CUNHA, PAULO R.L.HELENE. 39p.



**Escola Politécnica da USP - Deptº de Engenharia de Construção Civil**  
**Edifício de Engenharia Civil - Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2**  
**Cidade Universitária - CEP 05508-900 - São Paulo - SP - Brasil**  
**Fax: (11)38185715- Fone: (11) 38185452 - E-mail: secretaria@pcc.usp.br**