



CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO UTILIZADO NA CONFECÇÃO DE MANILHAS, DEVIDO À CARBONATAÇÃO.

Flávio Eduardo Gomes Diniz

Engenheiro Civil - Doutorando no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - DTM/CT
Universidade Federal da Paraíba – Campus I, João Pessoa – e-mail: flavioedu@yahoo.com.br

Eridon Celso Pereira

Professor do Departamento de Tecnologia Mecânica DTM/CT
Universidade Federal da Paraíba – Campus I, João Pessoa – e-mail: eridon@jpa.zaz.com.br

***Resumo.** O presente trabalho teve como objetivos: estudar a influência do meio na corrosão do concreto armado utilizado na confecção de manilhas; avaliar a utilização da técnica de resistência de polarização ($\Delta E=20mV$) e do potencial de eletrodo misto em relação ao eletrodo de referência ($Cu/CuSO_4$) e determinar a profundidade de carbonatação através do ensaio físico por meio de aplicação de fenolftaleína. Foram confeccionados corpos de prova prismáticos ($46 \times 94 \times 74mm$) em concreto (traço 1:2,01:1,97:0,46) contendo duas barras de aço CA-50 de 6.3mm de diâmetro dispostas de forma simétrica, longitudinal e paralela, submetidos à cura em meio aquoso por 28 dias. Ensaio foram desenvolvidos antes e após a carbonatação. Durante a carbonatação os corpos de prova foram mantidos em câmara rica em CO_2 por até 13 dias. A profundidade de carbonatação (y) segue uma lei logarítmica com o tempo (x), segundo a equação: $y=8,27 \log(x)+0,10$, regida por difusão. As densidades de corrente de corrosão apresentaram-se na média, superiores aos valores obtidos inicialmente antes da carbonatação, apresentando diminuição no decorrer do ensaio. Os potenciais de eletrodo, apresentaram uma diminuição para potenciais próximos de $-350mV_{esc}$, seguido de um aumento no final do ensaio, fruto da colmatação dos poros do concreto devido à formação de carbonato insolúvel.*

***Palavras-chave:** corrosão, carbonatação, concreto armado.*

1. INTRODUÇÃO

A humanidade chega ao século XXI tendo o concreto como o material industrial mais utilizado pelo homem, com um consumo per capita da ordem de 2,5 toneladas/ano. Este consumo confirma a sua importância como material de construção. Porém, como toda estrutura que usa componentes metálicos, o concreto armado é passível de corrosão degenerativa, resultado de reações naturais, que ocorrem num material interagindo com o meio ambiente, em conjunto com ações físicas, mecânicas ou de outras naturezas. O aço, obtido sob calor em atmosferas redutoras, tende a voltar a níveis de energia mais baixos transformando-se nos óxidos de ferro dos quais é oriundo.

A utilização do concreto armado na confecção de manilhas, utilizadas no transporte de rejeitos industriais e domésticos, tem apresentado alguns processos patológicos do concreto, decorrentes da atmosfera gerada pela decomposição desses rejeitos com teores elevados de gás sulfídrico e carbônico (Diniz, 2001). O ar contendo CO_2 que, na presença de umidade forma o ácido carbônico, reage com a pasta de cimento hidratada ($Ca(OH)_2$ formado durante a hidratação do cimento), produzindo o calcário ($CaCO_3$). Tal reação promove uma redução na alcalinidade para pH inferior a

9, e isso, associada à faixa de potencial de eletrodo misto encontrado para o sistema, despassiva a armadura de aço tornando-a suscetível à corrosão (Neville 1997).

O ataque do CO₂ agressivo ocorre quando a umidade livre na superfície das peças apresenta teores variáveis de CO₂, em grande parte absorvido do próprio ar, proporcionando a formação de ácido carbônico de acordo com a expressão:



Quando o ácido carbônico reage com a portlandita Ca(OH)₂, resulta em bicarbonato, segundo a fórmula (Prudêncio, 1986):



A carbonatação pode ter algumas conseqüências positivas. Como o CaCO₃ ocupa um volume maior que o Ca(OH)₂, que ele substitui, a porosidade do concreto carbonatado é menor. Além disso, a água liberada na carbonatação do Ca(OH)₂ pode ajudar a hidratação do cimento ainda não hidratado. Essas mudanças são benéficas e resultam em maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial, aumentando a resistência às formas de ataque controladas pela permeabilidade (Neville, 1997).

Nos casos em que os vasos capilares, poros do concreto endurecido, apresentam excesso de cal, o bicarbonato solúvel precipita transformando-se em carbonato insolúvel.



Esta forma de carbonato, colmata os poros do concreto tornando-o mais impermeável. Estas considerações somente são válidas para teores de CO₂ livre, agressivo, presente no meio de exposição inferior a 20mg/l.

Os fluidos com teor de CO₂ agressivo superior a 20mg/l atacam o carbonato de cálcio, transformando-o em bicarbonato solúvel.



Nestas condições o processo de dissolução prossegue deixando o concreto permeável e vulnerável ao ataque ácido que ao atingir a interface das barras das armaduras estabelece condições favoráveis para implantação de focos de corrosão (Prudêncio, 1986). Os objetivos deste trabalho foram: estudar a corrosão em concreto armado utilizado na confecção de manilhas, usadas nas redes coletoras de esgoto, considerando a influência do meio; avaliar a utilização de técnicas eletroquímicas e de ensaios físicos como forma de avaliação da corrosão ativa, tais como: a determinação do potencial de eletrodo misto em relação ao eletrodo de referência (Cu/CuSO₄), a resistência de polarização ($\Delta E = 20\text{mV}$) e a medida da profundidade de carbonatação através do ensaio físico por meio de aplicação de fenolftaleína.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Cimento

Foi utilizado durante todo o trabalho de pesquisa o Cimento Portland Composto com Filler, CP II F-32, da marca ZEBU, fabricado pela Cimepar, disponível na cidade de João Pessoa e utilizado pela empresa que cedeu o traço de concreto nesta pesquisa.

2.1.2. Água

A água de amassamento utilizada para a mistura do concreto foi a disponível no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – LABEME, proveniente do poço que faz parte do sistema de abastecimento de água do Campus I da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa.

2.1.3. Agregado Miúdo

Foi empregado como agregado miúdo, uma areia lavada do tipo quartzoza proveniente da jazida do Caxitu, localizada nas proximidades da cidade de João Pessoa, Estado da Paraíba, a qual foi gentilmente cedida pela empresa que fabrica as manilhas, evitando desta forma o uso de material diferente do utilizado na fábrica.

Foram realizados ensaios de caracterização do agregado miúdo, sendo tomado sempre a média de três determinações. A massa unitária, de acordo com a NBR-7251/82 (ABNT, 1982) apresentou valor de $1,68 \text{ kg/dm}^3$. Já a massa específica segundo a NBR-9776/87 (ABNT, 1987) foi de $2,60 \text{ kg/dm}^3$. O ensaio de determinação da composição granulométrica foi realizado conforme NBR 7217/87 (ABNT, 1987) para o agregado miúdo. O resultado da análise granulométrica classificou o agregado miúdo em estudo em função do módulo de finura. Portanto para um MF = 2,24, a areia ensaiada foi classificada como areia fina, apresentando $D_{\text{máx}} = 4,8\text{mm}$.

2.1.4. Agregado Graúdo

Foi empregado como agregado graúdo, uma pedra britada de origem granítica disponível no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – LABEME, cuja caracterização se deu sempre tomando-se a média de três determinações. A massa unitária no estado solto, de acordo com a NBR-7251/82 (ABNT, 1982) apresentou valor de $1,41 \text{ kg/dm}^3$ e a massa específica real segundo o Método da Proveta foi de $2,56 \text{ kg/dm}^3$.

O ensaio de determinação da composição granulométrica foi realizado conforme NBR 7217/87 (ABNT, 1987) para o agregado graúdo, apresentando MF = 6,75 e $D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$.

2.1.5. Aço para Armaduras

Para a armadura dos corpos de prova foi utilizado o GG50, CA 50, produzido pela Gerdau, de diâmetro 6.3mm.

2.1.6. Madeira para as Fôrmas

Para a moldagem dos corpos de prova de concreto foram utilizadas fôrmas confeccionadas com compensado comum (madeirite) de 12mm, cola fenólica.

2.1.7. Concreto

O traço de concreto estudado nesta pesquisa, foi cedido pela EMPRESA DE PREMOLDADOS S/A, empresa que fabrica dutos coletores de esgoto (manilhas), na cidade de João Pessoa. Traço unitário em peso: 1:2,01:1,97:0,46, com um consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 431 kg/m^3 .

Após a caracterização, pesagem e mistura dos materiais, 03 corpos de prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura foram moldados, adensados e colocados na cura, segundo as recomendações da NBR 5738/84 (ABNT, 1984), com o objetivo de caracterizar o concreto em relação a sua resistência à compressão aos 28 dias de idade. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 5739/84 (ABNT, 1984), apresentando como valor médio aos 28 dias $31,44 \text{ MPa}$.

2.2. Métodos

2.2.1. Corpos de Prova

Foram confeccionados corpos de prova prismáticos medindo 46x94x74 mm em concreto, no traço já mencionado, contendo duas barras de aço CA-50 de 6.3 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento (45 mm expostas ao concreto) dispostas de forma simétrica, longitudinal e paralela, a uma distância entre eixos de 31,3 mm, com cobrimento de 15 mm de concreto e submetidos à cura em meio aquoso por 28 dias, conforme ilustra a Fig. (1).

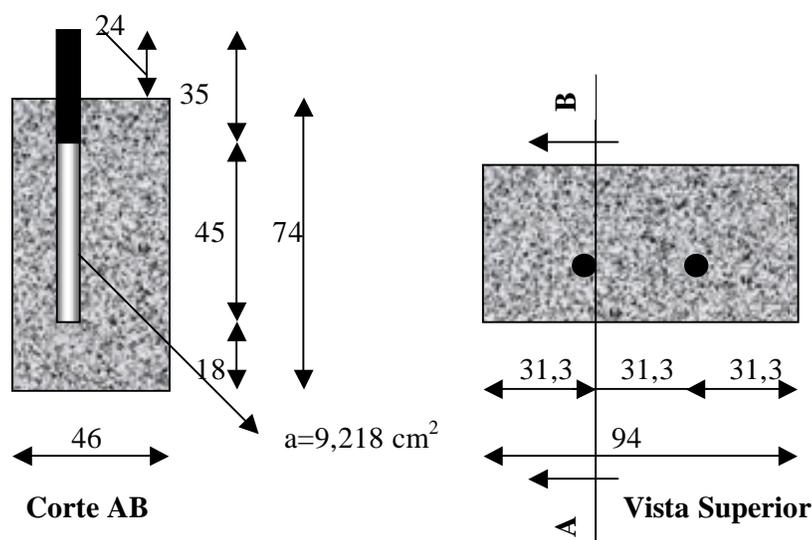


Figura 1. Vista superior e corte transversal AB dos corpos de prova de concreto utilizados no programa experimental.

2.2.2. Ensaio de Carbonatação

Primeiramente, em todos os corpos de prova foram feitas as medidas iniciais de potencial de eletrodo e de resistência de polarização (ΔE de 20mV).

O ensaio de carbonatação teve duração de 13 dias, realizado conforme a seguinte metodologia.

Os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação para o início do processo de carbonatação acelerada. No início do ensaio foi aplicado um fluxo de CO_2 de pureza comercial, com duração de 10 minutos, com pressão de saída do regulador de pressão do cilindro de 10 kgf/cm^2 . Após esse tempo de fluxo, a pressão foi reduzida, para manter um fluxo de CO_2 estimado em 2 l/h com o objetivo de manter a concentração de CO_2 próxima a 100%. A verificação do fluxo de saída do gás carbônico foi realizada através do borbulhamento no selo d'água. Quando era necessário abrir a câmara para a retirada dos corpos de prova, um novo fluxo com pressão igual ao inicial era dado por um intervalo de tempo de 2 minutos, quando novamente a concentração e o fluxo eram restabelecidos, conforme esquema da Fig. (2).

Inicialmente os ensaios foram realizados de hora em hora, durante 13 horas. Do segundo dia em diante os ensaios foram realizados uma vez ao dia. Todo o processo se passou como descrito no parágrafo anterior. Os corpos de prova, após serem retirados da câmara de carbonatação foram imediatamente submetidos aos seguintes ensaios: potencial de eletrodo, resistência de polarização para ΔV de 20mV e medida da profundidade de carbonatação. Esse procedimento se repetiu para todas as medidas.

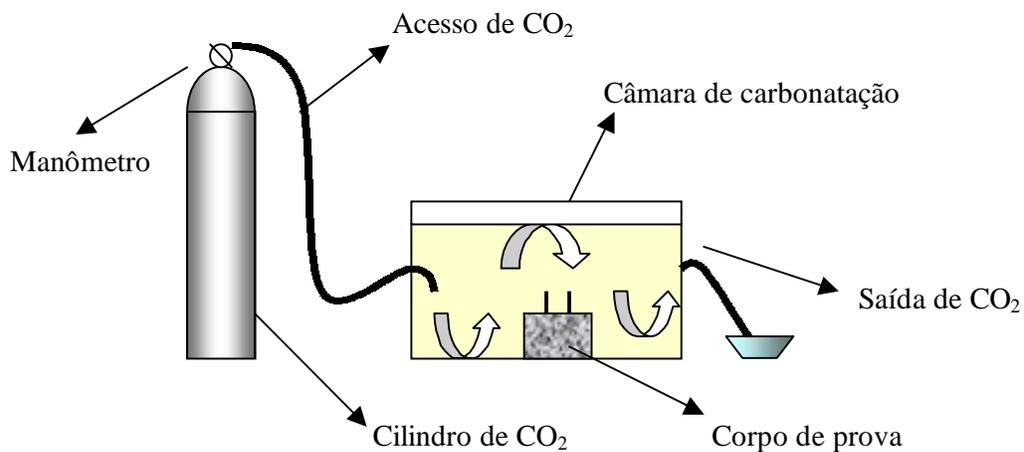


Figura 2. Representação esquemática da câmara de carbonatação.

- **Potencial de Eletrodo**

As medidas do potencial de eletrodo, mais propriamente o potencial misto desses eletrodos, foram realizadas com o auxílio de um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre – ESC e de um multímetro de alta impedância.

O eletrodo de referência foi colocado em contato com o corpo de prova através de uma esponja embebida em uma solução de detergente e a determinação do potencial se deu utilizando-se o multímetro ligado ao eletrodo de referência e à armadura, conforme ilustra a Fig. (3).

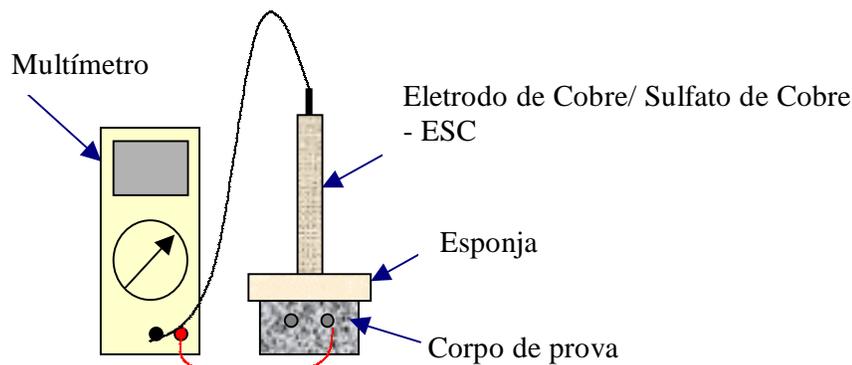


Figura 3. Esquema do ensaio de determinação do potencial de eletrodo.

- **Resistência de Polarização**

O ensaio foi realizado conforme o esquema mostrado abaixo na Fig. (4).

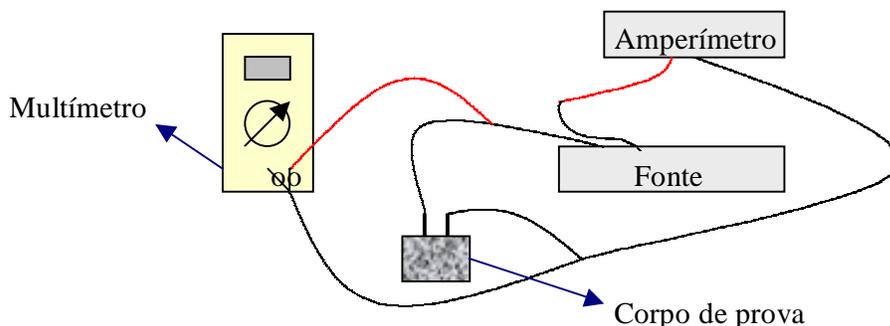


Figura 4. Esquema de montagem do ensaio de resistência de polarização.

Foi aplicado um potencial (ΔE de 20mV) através de uma fonte de alimentação (HP 6644A) e registrou-se o incremento de corrente (ΔI) em um amperímetro ligado em série à fonte, caracterizando assim um procedimento de polarização potenciostática. Um voltímetro ligado ao sistema permitiu a leitura dos potenciais. Desta maneira foi possível calcular o valor de R_p , e conseqüentemente a velocidade instantânea de corrosão (i_{corr}) através da expressão proposta por Stern-Geary, Eq. (5). O valor da constante de Stern-Geary (B) usado neste trabalho foi de 26mV (Cascardo, 1997).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (5)$$

onde:

R_p = Resistência à polarização;

B = Constante de Stearn-Geary dependente das contribuições anódicas e catódicas;

β_c e β_a = constantes de Tafel catódica e anódica;

ΔI = corrente aplicada;

ΔE = variação do potencial;

I_{corr} = corrente de corrosão.

• Medida da Profundidade de Carbonatação

Realizados todos os ensaios anteriormente descritos, os corpos de prova foram fraturados e uma solução indicadora de pH (solução alcoólica de fenolftaleína a 1%) foi aplicada permitindo a determinação das superfícies com pHs superiores e inferiores a 9 e, desta forma mensurar a espessura carbonatada das superfícies internas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Medida da Profundidade de Carbonatação

A Figura (5) mostra a evolução dos valores da profundidade de carbonatação em milímetros ao longo do tempo. O período de ataque do CO_2 foi de 288 horas e as medidas realizadas com 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216, 240, 264 e 288 horas.

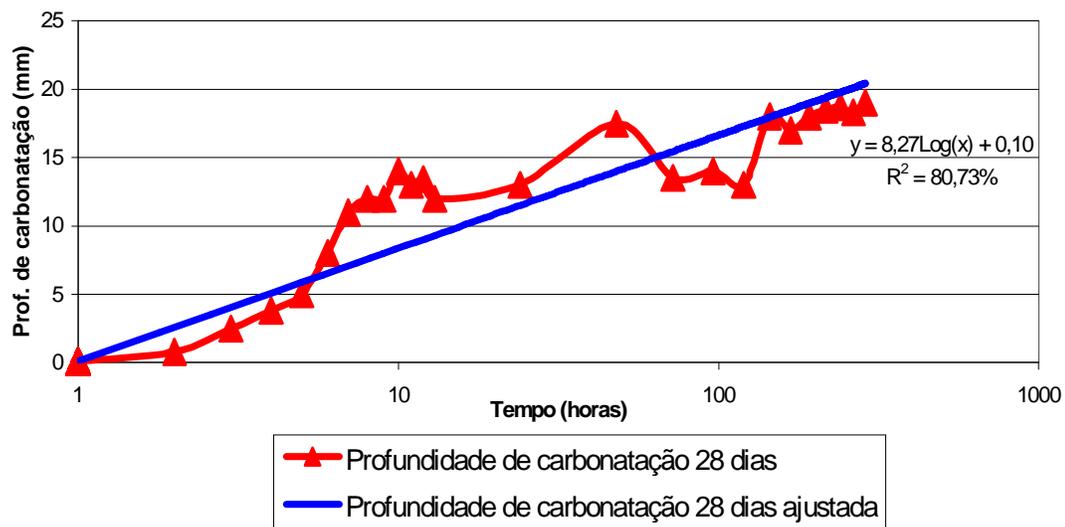


Figura 5. Profundidade de carbonatação (mm) ao longo do tempo.

Na Figura (5) é possível observar o comportamento da penetração do gás carbônico nos corpos de prova de concreto, obtido pela fratura destes e imediata aplicação de fenolftaleína. A profundidade máxima alcançada durante o ensaio se deu na última medida, com valor de 19 mm.

Também é possível visualizar de acordo com a reta, que determina a linha de tendência dos dados ($y = 8,27 \text{ Log}(x) + 0,10$), a qual segue uma lei logarítmica, que a frente de carbonatação atinge o valor do cobrimento de concreto que protege o aço (15 mm) após 48 e antes das 72 horas, terceiro dia de ensaio (aproximadamente 64 horas). Diniz & Pereira (2001) atacando o mesmo material com H_2S por um mesmo período de tempo obteve uma profundidade de ataque de apenas 6,5 mm, valor praticamente três vezes menor do que o encontrado para o gás carbônico neste trabalho.

3.2. Potencial de Eletrodo

A Figura (6) mostra os potenciais de eletrodo P1 e P2 em mV, situados à direita e à esquerda dos corpos de prova respectivamente, em relação ao eletrodo de Cu/CuSO_4 obtidos antes e após os períodos de carbonatação.

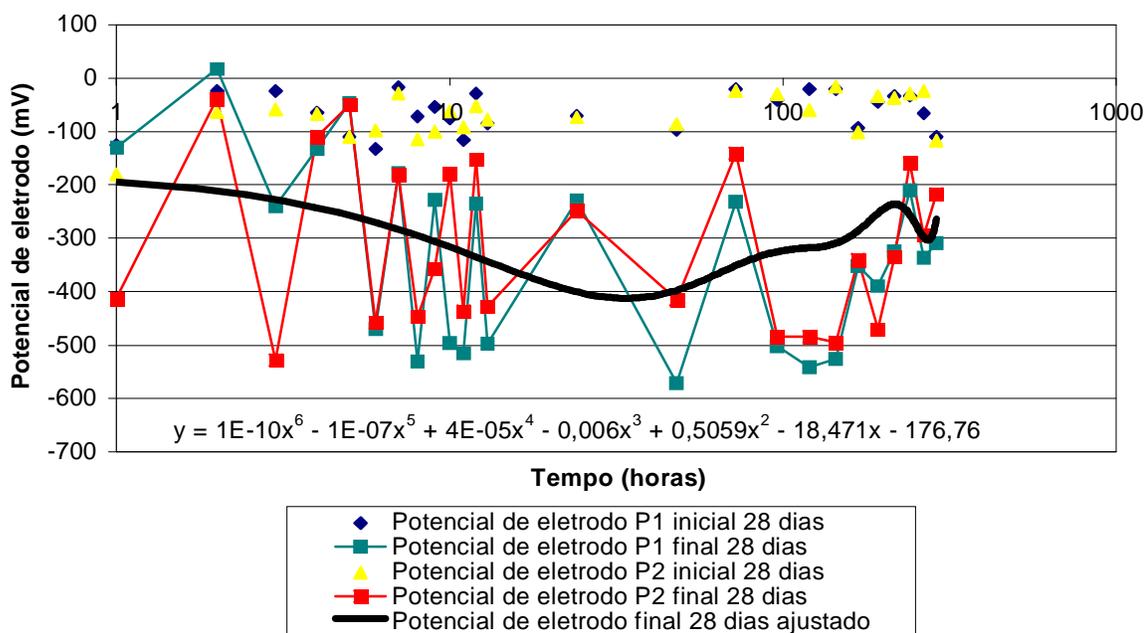


Figura 6. Potenciais de eletrodo P1 e P2 dos corpos de prova com 28 dias de cura determinados antes do ataque do CO_2 e ao longo do tempo de carbonatação.

Apesar da variação existente, observa-se uma redução dos potenciais de eletrodo em relação a sua condição inicial, antes da carbonatação. Esta variação pode ser atribuída a um processo de polarização da curva de reação catódica do oxigênio. No final do ensaio ficou evidenciado um aumento dos valores dos potenciais de eletrodo em relação aos obtidos numa fase intermediária do ensaio. Este fato pode ter relação com a formação de carbonatos insolúveis junto à superfície do aço, devido à reação de carbonatação em excesso de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita), levando a uma possível polarização da curva de reação anódica do aço. Monteiro (1996) em seus estudos utilizando argamassa com o mesmo tipo de cimento e fator água/cimento de 0,4, com os mesmos períodos de cura e ensaio encontrou valores que não ultrapassaram -100mV , ao passo que neste trabalho foram obtidos resultados menores que -400mV .

3.3. Resistência de Polarização

A Figura (7) mostra a evolução dos valores das taxas ou velocidades de corrosão (i_{corr}) inicial e final dada pela densidade de corrente de corrosão em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ao longo do tempo de carbonatação.

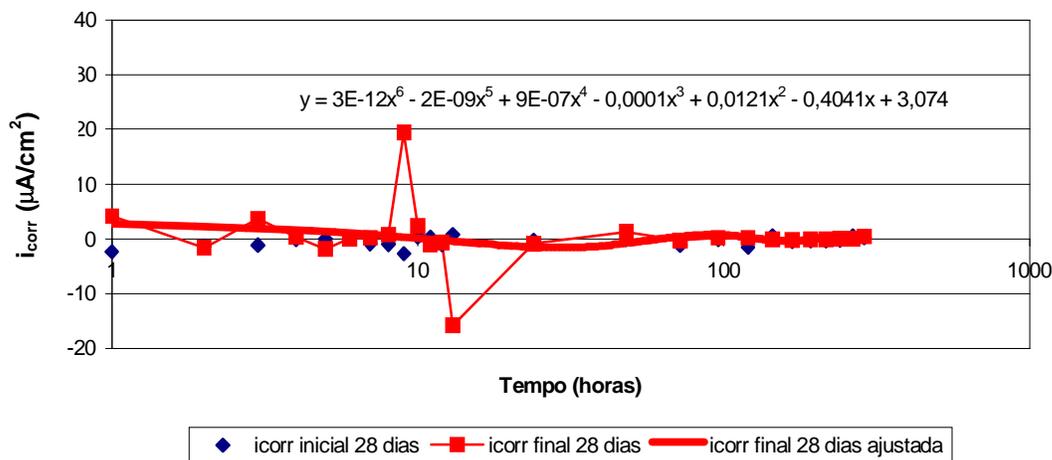


Figura 7. Densidades de corrente de corrosão dos corpos de prova com 28 dias de cura determinados antes do ataque do CO_2 e ao longo do tempo de carbonatação.

O comportamento final das densidades de corrente de corrosão em relação ao inicial (antes do ataque do CO_2) mostra que praticamente todas as medidas são superiores às iniciais, embora algumas tenham apresentado valor negativo tanto no início quanto no final.

As densidades de corrente de corrosão obtidas através do ensaio de resistência de polarização apresentam-se no início do período de carbonatação bastante esparsas e, na média, sempre superiores aos valores obtidos para os mesmos corpos de prova antes da carbonatação. Com o decorrer do ensaio observa-se que as densidades de corrente de corrosão após a carbonatação tendem aos mesmos níveis que as obtidas antes do ataque, chegando a estes no período final do ensaio. Monteiro (1996) em seus estudos utilizando argamassa com o mesmo tipo de cimento e fator água/cimento de 0,4, com os mesmos períodos de cura e ensaio encontrou valores que não ultrapassaram $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ durante todo o ensaio. Neste trabalho foram atingidos valores superiores a este na maioria das medidas.

4. CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos concluiu-se:

No ensaio de determinação da profundidade de carbonatação com o tempo, o comportamento observado pode ser atribuído à:

- este processo é regido por difusão;
- pode ter ocorrido colmatção dos poros do concreto devido à formação de carbonato insolúvel, mais provável em concretos com maior concentração de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou seja, em concretos com maiores períodos de cura.

Nos ensaios de determinação do potencial de eletrodo misto e de resistência de polarização, o comportamento apresentado com baixas densidades de corrente de corrosão e altos potenciais mistos foi atribuído:

- nos corpos de prova não carbonatados, à formação de uma camada passiva devido ao alto pH do concreto,

- no decorrer da carbonatação, um aumento na densidade de corrente de corrosão associado a uma diminuição no potencial indicam uma polarização da curva catódica de redução do oxigênio e desestabilização da camada passiva,
- no final do ensaio, uma diminuição da densidade de corrente de corrosão e um aumento no potencial misto estão associados a uma polarização da curva anódica, fruto da colmatação dos poros do concreto devido à formação de carbonato insolúvel.

5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. NBR 7251: agregados em estado solto–determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. NBR 9776: agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. NBR 7217: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984. NBR 5738: moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndrico ou prismático. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984. NBR 5739: ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro.
- Cascudo, O., 1997. O controle de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: Pini. 237 p. ISBN 85-72660-080-1.
- Diniz, F. E. G., 2001. Corrosão de materiais metálicos ferrosos empregados em dutos coletores de esgotos. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- DINIZ, F.E.G. & PEREIRA, E. C., 2001. Avaliação da corrosão em concreto armado utilizado na confecção de manilhas, em contato com gás sulfídrico (H₂S), através de técnicas eletroquímicas e ensaios físicos. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC, 53., 2001, Salvador. Anais/Resumos... Salvador: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 1 CD-ROM.
- Monteiro, E. C. B., 1996. 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. 135 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Neville, A. M., 1997. Propriedades do concreto. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2. ed. rev. atual. São Paulo: Pini. 828 p. ISBN 85-7266-068-2.
- Prudêncio, W. J., 1986. Carbonatação da superfície das estruturas de concreto armado. In: Seminário Nacional de Corrosão na Construção Civil, 2., 1986, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABRACO p. 147-159.

CORROSION ON REINFORCED CONCRETE USED IN THE PREPARING OF PIPE OF CLAY, DUE TO THE CARBONATION.

Flávio Eduardo Gomes Diniz

Civil Engineer – One about to graduate as a doctor in the Posgraduation Course in Mechanical Engineering - DTM/CT

Federal University of Paraíba – Campus I, João Pessoa – e-mail: flavioedu@yahoo.com.br

Eridon Celso Pereira

Teacher of the Mechanical Technology Department DTM/CT

Federal University of Paraíba – Campus I, João Pessoa – e-mail: eridon@jpa.zaz.com.br

Abstract. *The present work had as objectives: to study the ambient influence on the corrosion of the reinforced concrete used in the preparing of the pipe of clay, to estimate the utilization of the technique of polarization resistance ($\Delta E=20mV$) and of the mixed electrode potential in relation to the reference electrode ($Cu/CuSO_4$) and to determine the profundity of carbonation through the physical tests with the use of phenolphthalin. Prismatical bodies of tests (46x94x74mm) of concrete were made (mixture 1:2,01:1,97:0,46) containing two steel bars CA-50 with 6.3mm of diameter disposed in a simetric form, longitudinal and parallel, submitted to the curing in a watery ambient during 28 days. Tests were developed before and after the carbonation . During the carbonation the bodies of tests were maintained in a cabin rich in CO_2 for until 13 days. The profundity of carbonation (y) follows a logaritimic law according to the equation: $y=8,27 \log(x)+0,10$, conducted by diffusion. The densities of current of corrosion were in the average, up to the values obtained before the carbonation, presenting decrease during the test. The electrode potential exhibeted a decrease to the potentials near $-350mV_{esc}$, followed of an increased on the end of the test, due to the closement of the pores of the concrete due to the formation of insoluble carbonate.*

Key words: *corrosion, carbonation, reinforced concrete.*