

O efeito da corrosão do aço no concreto aparente com cimento portland branco: um problema que se apresenta quando da concepção do projeto arquitetônico

AMILTON SANGOI ANTUNES¹

CARLOS FERNANDO GUIMARÃES SEFFRIN²

LUCIANO MILESI MACIEL³

RONALDO TOMAZI³

MARCOS ALBERTO OSS VAGHETTI⁴

RESUMO

O concreto estrutural branco traz desafios para tecnologistas e pesquisadores no sentido de compreender melhor seu desempenho frente às agressividades do meio. Procura-se, através desse trabalho, contribuir para um problema que está se tornando importante para as obras em Concreto Branco, que é a corrosão do aço no interior desses concretos. A pesquisa que originou este trabalho está sendo desenvolvida na ULBRA/Santa Maria/RS, em parceria com a UFSM e tem por objetivo verificar, experimentalmente, os efeitos causados pela corrosão das armaduras no concreto aparente, com cimento Portland branco, dando ênfase para essa importante manifestação patológica que, cada vez mais, preocupa os projetistas e empreendedores dessas obras especiais.

Palavras-chave: Corrosão, concreto branco, carbonatação, cimento portland branco.

¹Acadêmico do Curso de Arquitetura e Urbanismo/ULBRA, Santa Maria, RS - Bolsista PROICT/ULBRA/SM

²Acadêmico do Curso de Arquitetura e Urbanismo/ULBRA, Santa Maria, RS - Bolsista BIC/FAPERGS

³Acadêmicos do Curso de Arquitetura e Urbanismo/ULBRA, Santa Maria, RS

⁴Professor-Orientador do Curso de Arquitetura e Urbanismo/ULBRA, Santa Maria, RS (marcos.vagheti@net.crea-rs.org.br)

ABSTRACT

The concrete structural white brings challenges for technologists and researchers in the sense of understanding his acting front better to the aggressiveness of the middle. It is sought through of that work, to contribute for a problem that is becoming important for the works in White Concrete, that it is the corrosion of the steel in the inside of those concretes. The research that originated this work is being developed in ULBRA/Santa Maria/RS in partnership with UFSM and she has for objective to verify the effects experimentally caused by the corrosion of the rebars in the apparent concrete with cement Portland white, giving emphasis for that important pathological manifestation that more and more worries the planners and enterprising of those special works.

Keywords: Corrosion, concrete white, carbonation, cement Portland white.

INTRODUÇÃO

Entre os materiais empregados na construção civil atualmente, o concreto é, sem dúvida, o mais largamente utilizado. Apresenta vantagens como a facilidade de obtenção dos seus materiais componentes na natureza; sua preparação não é demorada e não exige treinamento especializado; pode ser executado numa variedade de formas e tamanhos; bem como as suas características e propriedades, quando utilizadas em conjunto com o aço (concreto armado ou protendido), são praticamente imbatíveis no que diz respeito ao aspecto econômico e estrutural.

Estima-se que o consumo mundial de concreto é da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Este elevado consumo, aliado ao fato de a produção do concreto requerer menor consumo de energia, qualifica-o como um material que exige uma atenção especial de pesquisadores no sentido de conhecer amplamente seu desempenho e, eventualmente, adequá-lo frente às necessidades do mercado consumidor.

Nos últimos anos, a demanda por construções que utilizam o concreto é muito significativa.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC: <<http://www.snic.org.br>>), no ano de 2003, a produção dos dez maiores grupos industriais de cimento no Brasil ultrapassou a marca de 34 milhões de toneladas, chegando ao nível mais alto da história entre os maiores produtores mundiais de cimento. Produziu-se, também, segundo a Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil (ANEPAC: <<http://www.anepac.org.br>>), no ano de 2000, 141 milhões de m³ de areia e 97 milhões de m³ de pedra britada. Com relação ao aço, segundo dados preliminares do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS: <<http://www.ibs.org.br>>), a produção brasileira de aço bruto, no ano de 2004, foi de aproximadamente 30 milhões de toneladas (VAGHETTI, 2005).

Esses números dão uma idéia do consumo de concreto (cimento e agregados) e aço no país nos últimos anos. Este crescimento, porém, não foi acompanhado de uma legislação, norma técnica ou pesquisa científica que relacionasse a interdependência entre a agressividade do meio e a durabilidade do concreto e da armadura. Deste modo, tem-se notado, nos últimos anos, um número crescente de estruturas de concre-

to armado e protendido com sinais visíveis de deterioração pela corrosão da armadura.

Problemas com a corrosão do aço no concreto trazem ao Brasil um prejuízo anual de 3,5 a 4,0% do Produto Interno Bruto (PNB), segundo a Comissão de Estudos de Corrosão de Elementos Metálicos em Concreto da ABNT (CONSTRUÇÃO, 1991). Para um PNB de cerca de 467 milhões de reais, temos um gasto de 18,7 milhões de reais por ano em recuperação de estruturas de concreto armado e protendido, deterioradas pela corrosão da armadura. Ainda, segundo Gemelli (2001, p.xiii), "...estima-se que a corrosão destrua 25% da produção mundial de aço por ano, o que corresponde a várias (5 a 7) toneladas por segundo... O custo total da corrosão está avaliado em 4% do produto nacional bruto".

Além do aspecto econômico, acidentes envolvendo estruturas deterioradas pela corrosão da armadura constituem-se em fatos lamentáveis, pois causam perdas humanas e materiais, transtornos aos que utilizam a obra pela sua interdição e implicam em onerosa reparação.

Exemplo disso foi o risco de colapso da Ponte dos Remédios em São Paulo, que em 1997 colocou em perigo a segurança dos usuários, revelando o estado grave das obras de arte no Brasil. O problema foi resolvido com soluções criativas e eficientes, mas ficou a questão sobre as possíveis causas do processo de corrosão dos cabos

protendidos desta obra de arte (TÉCHNE, 1997).

Aliando a utilização de um dos materiais mais consumidos, que é o concreto armado, e sua deterioração mais importante, que é a corrosão das armaduras, busca-se inserir, nesse contexto, os problemas enfrentados pelos arquitetos quando da concepção de suas obras em concreto aparente, em especial empregando, na fabricação desse concreto, o cimento Portland branco.

O concreto aparente, apesar da robustez proporcionada pelo material, tem muita leveza no seu aspecto estético, principalmente quando os arquitetos concebem peças estruturais com significativa esbeltez. Atualmente, vêm crescendo muito as obras que empregam concreto aparente com cimento Portland branco. Pode-se citar, a nível mundial, várias obras que empregaram o concreto branco estrutural em seus projetos, tais como: a *Igreja Dives in Misericórdia* (Figura 1a) em Roma; *Pavilhão da Expo'98* e *Torre do Tombo* em Lisboa; *Catedral da Arquidiocese* em Los Angeles. No Brasil, a utilização desse concreto iniciou no ano de 2000, com a construção do *Edifício Flexotronics* em Sorocaba/SP. A partir daí, várias obras foram e estão sendo executadas com concreto estrutural branco, como, por exemplo: *Panamerica Park* em São Paulo, *Ponte Irineu Bornhausen* em Brusque/SC, *Museu Iberê Camargo* (Figura 1b), em Porto Alegre/RS, iniciada em 2003, a obra mais importante em Concreto Branco atualmente em execução no Brasil.

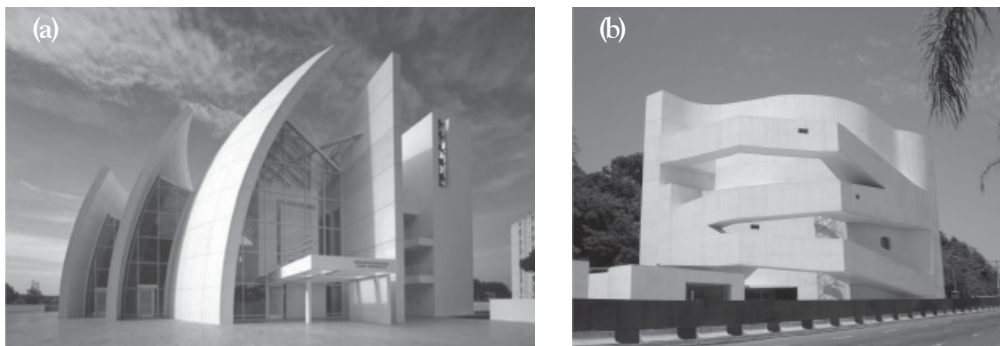


Figura 1 – (a) Igreja *Dives in Misericórdia*, projeto do arquiteto Richard Méier, (b) Museu Iberê Camargo, projeto arquiteto português Álvaro Siza

Ao mesmo tempo que o apelo estético fica muito evidente na concepção de edificações em concreto aparente com cimento Portland branco, surge um problema de durabilidade desse material em longo prazo, que muito incomoda o meio técnico-científico, que é a corrosão das armaduras, bem como também incomoda em especial, os arquitetos que projetam essas obras, pois os efeitos que advêm desse problema, como as manchas superficiais (ferrugem) nos elementos estruturais (vigas, pilares e lajes), causam verdadeiro desconforto aos proprietários, que precisam conviver com essa patologia e também dispender de recursos financeiros para tentar solucioná-la ou amenizá-la.

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho de iniciação científica é de verificar, experimentalmente, os efeitos causados pela corrosão das armaduras no concreto aparente com cimento Portland branco, com a corrosão sendo induzida por carbonatação e acelerada por ciclos de molhagem/secagem. A pesquisa está sendo desenvolvida no campus da ULBRA/Santa Maria/RS e conta com a parceria, para seu delineamento experimental, do Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da UFSM.

Neste sentido, coloca-se a importância de se implementar uma pesquisa que venha a contribuir para o conhecimento mais aprofundado sobre a corrosão do aço no concreto aparente com cimento Portland branco, principalmente devido ao aumento do número de construções com esse material que se projeta para o futuro, tendo em vista especialmente a beleza que elas proporcionam, como também aos aspectos técnicos envolvidos com a patologia da corrosão, que instiga os pesquisadores em descobrir novas soluções para tentar diminuir ou evitar esse problema.

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais escolhidos para a pesquisa experimental foram os seguintes: cimento branco (CPB-40) e cimento cinza CPV-ARI; agregados: areia média (natural e calcária) e brita 01 (rochas diabásicas e calcárias); bem como o aço utilizado nos corpos-de-prova foi de bitola 8mm (CA-50).

A investigação contou com os seguintes ensaios: ensaios de trabalhabilidade, ensaios físicos, moldagem dos concretos; ensaios de cura e de resistência à compressão axial, carbonatação

acelerada e de potencial de corrosão. No ano de 2008 estarão sendo realizados os ensaios de aceleração da corrosão por ciclos de molhagem/secagem para o objetivo final de avaliar o grau de corrosão do aço nos concretos através do ensaio não-eletroquímico da perda de massa gravimétrica.

Na fase de proporcionamento dos traços de concreto (Tabela 1), tanto para o “concreto cin-

za” quanto para o “concreto branco”, foram realizados ensaios de trabalhabilidade (consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR 7223), conforme Figura 2, com o objetivo de determinar as dosagens adequadas de cimento, areia, pedra, água para cada traço, desejando sempre um teor ótimo de argamassa para um determinado nível de consistência da mesma.

Tabela 1 – Tipos de concretos

TRAÇO	TIPO	CIMENTO	SIGLA
1	CONCRETO CINZA (Referência)	CPV-ARI	CC
2	CONCRETO BRANCO	CPB-40	CB

Para cada um dos traços de concreto foram estudados três níveis de resistências, representados pelas relações água/cimento 0,50 ; 0,60 e

0,70. Portanto, foram moldados 6 traços diferentes, três para cada um dos concretos.



Figura 2 – Ensaio de trabalhabilidade

Para os ensaios voltados à corrosão das armaduras, os corpos-de-prova (c.p.) tiveram as seguintes dimensões: 10,0 cm x 10,0 cm x 6,0 cm. A Figura 3 mostram o c.p. prismático utilizado

no experimento, evidenciando a região da barra exposta à corrosão, bem como os afastamentos laterais da mesma no interior do concreto (todas as medidas estão em ‘cm’).

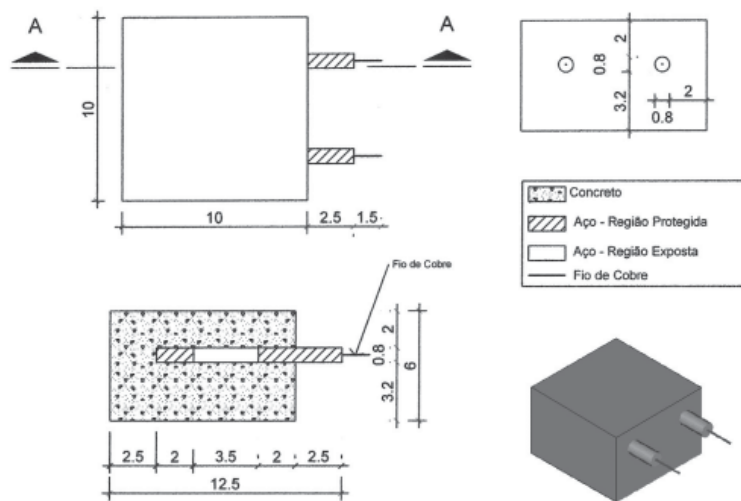


Figura 3 – Vistas superior e frontal, corte AA e perspectiva do c. p.

A preparação do aço ($\varnothing 8\text{mm-CA50}$) para ser colocado dentro dos c.p. $10 \times 10 \times 6\text{cm}$ foi realizada da seguinte maneira: primeiramente, procedeu-se uma limpeza com decapagem mecânica, através de escova de aço em equipamento giratório sob alta rotação, eliminando a ferrugem superficial até alcançar a condição de “metal branco”. Após, as barras foram limpas em uma solução contendo ácido clorídrico e água desti-

lada, na proporção 1:1 mais 2 g/l de um inibidor de corrosão (hexametilitotetramina). Para essa limpeza, as barras foram imersas na solução e vibradas com um gerador de ultra-som, sendo, depois, lavadas em água corrente, escovadas com escova de cerdas plásticas, mergulhadas em acetona e secas com ar quente, segundo procedimento ASTM G1/1990. Estes trabalhos estão ilustrados nas Figuras 4 e 5 a seguir .

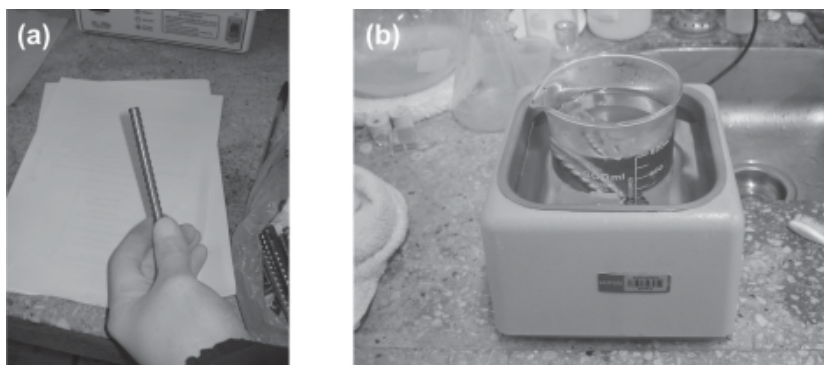


Figura 4 – (a) Aço após limpeza com decapagem mecânica, (b) limpeza das barras de aço por imersão em solução ácida e vibração com um gerador de ultrasom



Figura 5 – (a) lavagem em água corrente das barras, escovadas com escova de cerdas plásticas e (b) secas com ar quente

Após a moldagem dos corpos-de-prova (Figura 6), os mesmos foram colocados em câmara úmida por 35 dias. Ao término desse período, os corpos-de-prova foram acondicionados por 21 dias (3 semanas) numa sala climatizada (Figura 7) com umidade e temperatura controladas (UR

entre 65%-75% e $T \sim 23^{\circ}\text{C}$) para equilíbrio da umidade interna, período de pré-condicionamento. O objetivo do pré-condicionamento foi de dotar os corpos-de-prova de um ambiente aéreo e com uma distribuição uniforme da água evaporável.



Figura 6 – (a) Concretos adensados em mesa vibratória e (b) concretos após moldagem

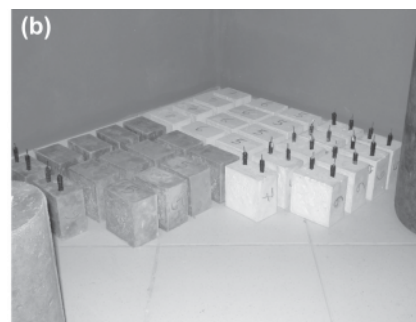


Figura 7 – (a) Corpos-de-prova desmoldados (b) c.p. na sala climatizada

Para avaliar a resistência dos concretos, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial (NBR 5738) nas idades de 7, 28 e 91 dias (Figura 8). O ensaio de potencial de eletrodo ou de corrosão (Figura 9), que avalia o estado superficial do aço mediante leituras

eletroquímicas, segundo método descrito na ASTM C 876 (1991), foi realizado inicialmente aos 35 dias e após semanalmente. O equipamento utilizado foi um pH-metro/milivoltímetro de alta impedância de entrada, da marca ANALION, e um eletrodo de calomelano saturado (ECS).



Figura 8 – Ensaio de resistência à compressão axial



Figura 9 – Ensaio de potencial de corrosão

O ensaio de indução da corrosão por carbonatação acelerada foi realizado em uma caixa de cimento amianto adaptada para uma câmara com umidade e temperatura controladas (Figura 10). Para isso, foi retirado aproximadamente 10% de ar

em relação ao volume total da câmara (1000 litros), através de uma bomba de vácuo e posteriormente injetado 10% de CO_2 . Com isso, a atmosfera da câmara ficou propícia para a carbonatação dos corpos-de-prova em regime acelerado.

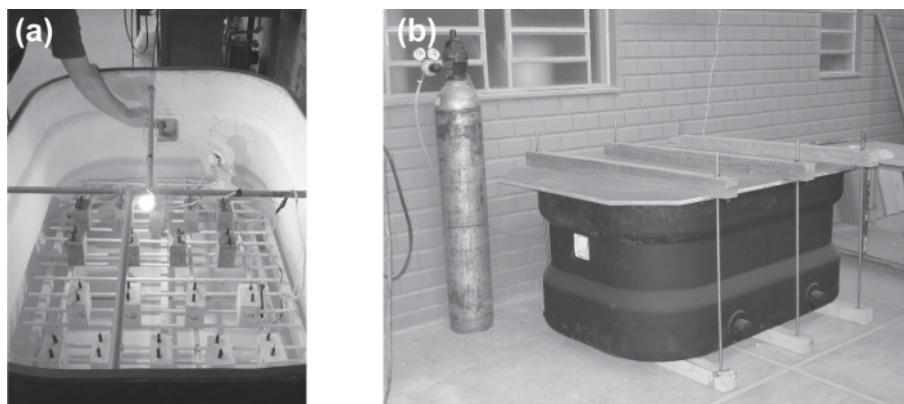


Figura 10 – Câmara de carbonatação (a) interior e (b) exterior

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a pesquisa a partir de 2008 entra numa fase final, com a obtenção dos dados quantitativos da perda de massa gravimétrica (densidade de corrente de corrosão), os resultados obtidos

até o momento que efetivamente servem para a análise dos aspectos que envolvem a corrosão do aço no concreto foram os de resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias (Figura 11), bem como as leituras eletroquímicas do potencial de corrosão do período de indução da corrosão por carbonatação acelerada (Figuras 12 e 13).

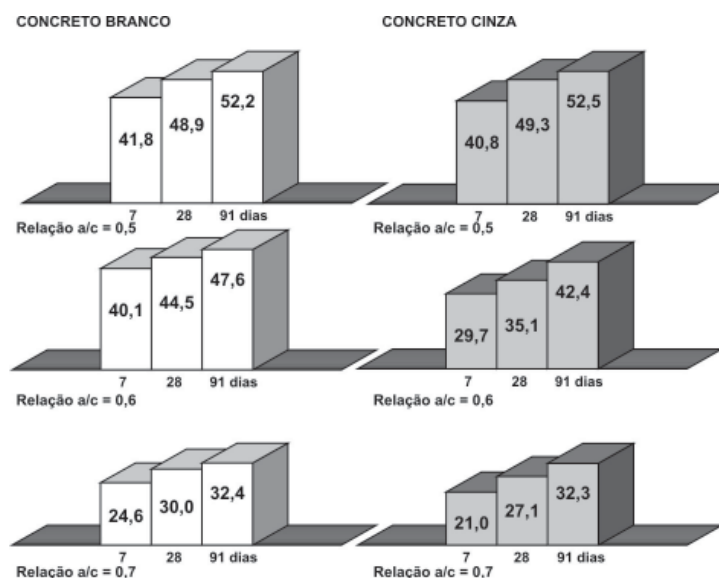


Figura 11 - Resultados da resistência à compressão axial (MPa) aos 7, 28 e 91 dias de idade, dos concretos branco e cinza.

Os resultados de resistência à compressão axial e potencial de corrosão estão colaborando para elucidar e diagnosticar o desempenho do concreto branco frente à corrosão quando comparado com o concreto cinza (de referência), especificamente quando se faz uma análise diante de outras pesquisas envolvendo esse tema, podendo-se citar a pesquisa de Kirchheim et al., 2005, que também obteve resultados semelhantes no tocante à resistência à compressão axial.

Especificamente quanto aos resultados qualitativos do potencial de corrosão (Figuras 12 e 13), pode-se verificar que todos os aços analisados, para os dois tipos de concreto nas quatro primeiras semanas do período de pré-condicionamento, apresentaram muita variação nos resultados, ficando entre + 50 mV e -200 mV. Nesse período de 4 semanas, o aço ainda está no estado passivo e com o concreto (pH elevado) protegendo a armadura.

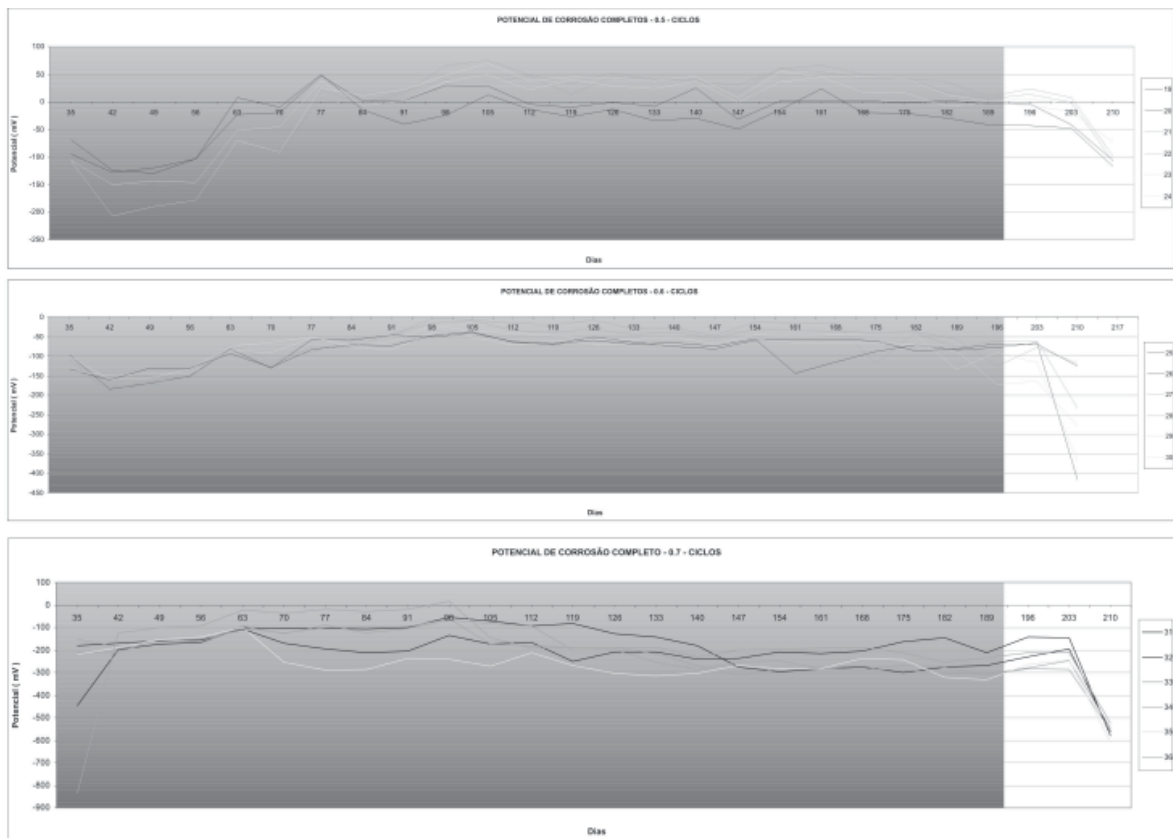


Figura 12 – Potencial de corrosão (mV) no período de indução por carbonatação acelerada para o concreto cinza.

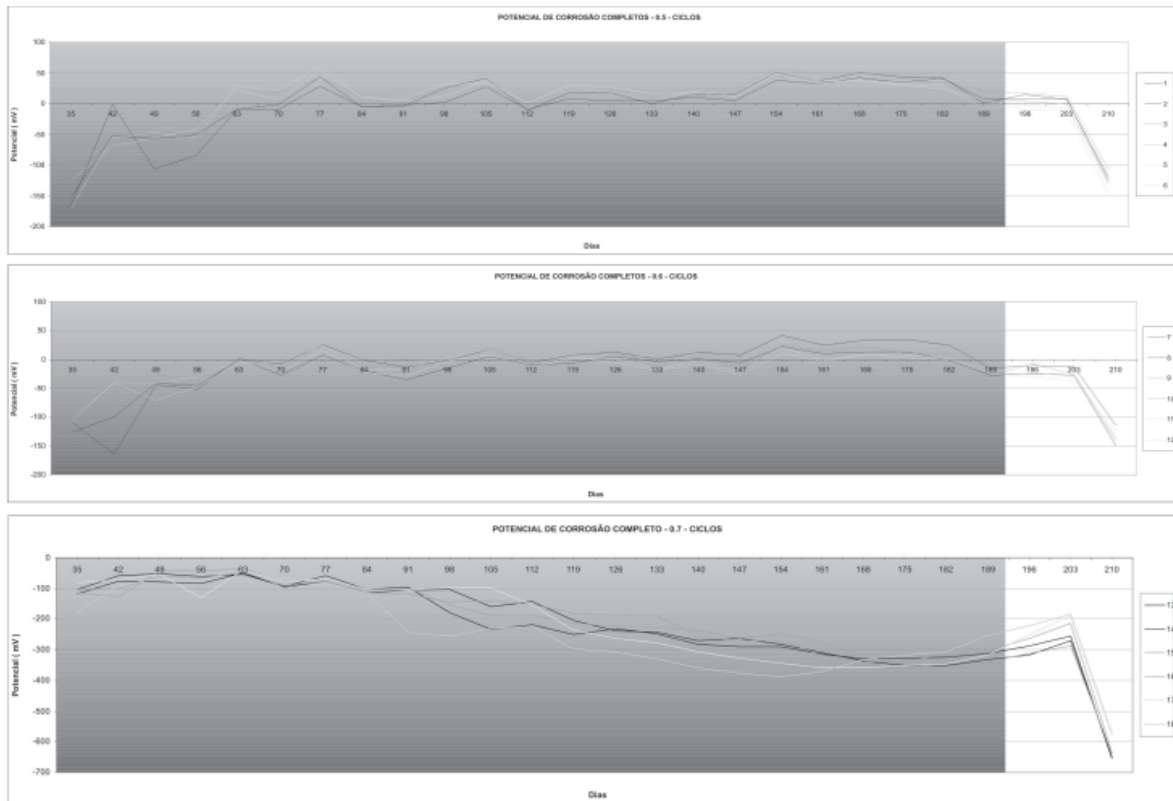


Figura 13 – Potencial de corrosão (mV) no período de indução por carbonatação acelerada para o concreto branco.

Com o início do período de indução por carbonatação acelerada (aos 63 dias), o avanço da frente de carbonatação na primeira semana (entre 63 e 70 dias) dos corpos-de-prova dentro da câmara já se fez sentir nos resultados de potencial, havendo uma tendência a valores mais negativos para os aços nos dois tipos de concreto, especialmente àqueles com maior porosidade (relação a/c = 0,70).

Nas semanas seguintes, pode-se verificar até uma elevação nos valores dos potenciais para os dois tipos de concreto (CC e CB). Esse enobrecimento dos potenciais, segundo alguns autores, entre eles Andrade et al (1988), pode ser devido à redução da umidade em função da

evaporação d'água através das reações de carbonatação, ficando esse processo facilitado em concretos mais porosos, com relações a/c mais elevadas. Ainda assim, com os concretos mais resistivos (relação a/c = 0,50) nota-se que praticamente os potenciais não se alteraram.

Verifica-se também que nas 20 semanas de carbonatação acelerada (dos 63 aos 203 dias), os potenciais dos aços tiveram oscilações para valores positivos e negativos, mas a tendência mostrou que o concreto branco, por ser mais resistivo, impediu que os potenciais dos aços ficassem na faixa negativa quando comparado com os aços do concreto cinza.

Na análise das Figuras 12 e 13 para o período de aceleração da corrosão através dos ciclos de molhagem/secagem, verifica-se já logo no início dos ciclos (entre 203 e 210 dias) uma queda significativa nos potenciais, passando de valores +20 mV para valores até -600 mV.

Fica evidente que somente a carbonatação dos concretos não é suficiente para provocar a corrosão do aço propriamente dita, necessitando muito que a umidade preencha os poros do material e contribua para aumentar a mobilidade iônica e mais precisamente o transporte dos íons das regiões anódicas para as regiões catódicas através do eletrólito.

Espera-se que durante esse período de ciclos de molhagem/secagem, os potenciais permaneçam na faixa entre -200 mV e -600 mV, acelerando o processo corrosivo dos aços.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa de iniciação científica de cunho experimental reveste-se de uma importância significativa, não só pelo engrandecimento do curso e sua inserção em pesquisa, mas sobretudo pelo envolvimento dos recursos humanos de forma contundente na criação de um espírito de grupo, favorecendo as relações interpessoais tão necessárias à formação do caráter do acadêmico e posteriormente do profissional, além de reverter em benefício da instituição ULBRA, que participa deste processo de formação científica e intelectual, merecendo destaque no cenário regional e nacional.

Provavelmente, em meados de abril de 2008, teremos uma gama de resultados de corrosão

(tanto qualitativos como quantitativos) que irá nos possibilitar a tomada de conclusões mais efetivas sobre o foco principal do trabalho, contribuindo para elucidar mais o comportamento da corrosão do aço no concreto branco.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for preparing, cleaning and evaluating test specimens.** ASTM G1-90. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1990 (Reapproved 1994).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.** ASTM C 876. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1991.

ANDRADE, C.; GONZÁLES, J.A. Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. **Informes de la Construcción**, v.40, n.398, p. 7-14, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos.** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone - ensaio de abatimento:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

CONSTRUÇÃO - Região Sul. Corrosão sob controle. **PINI**, n.269, mar.1991, p.15.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

KIRCHHEIM, A.P et al. Análise comparativa da utilização de diferentes sistemas de proteção de corrosão de armaduras na aderência entre concreto branco e barras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBC, 2005. p.vii.1-vii.10.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concre-**

to: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

TÉCHNE. "Nó reatado". **PINI**, ano 5, n.30, p.31-36, set/out 1997.

VAGHETTI, M.A.O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.