

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Corrosão de armadura de estruturas de concreto leve com ar incorporado

Adriana de Araujo^a; Zehbour Panossian^b, Mírian Cruxên B. de Oliveira^c, David R. das Neves Filho^d, Alberto D. Siqueira Junior^e

Abstract

This article presents the results of field inspections and laboratory testing which have shown the susceptibility of premature corrosion of carbon steel reinforcement walls of air-entrained concrete casting in loco. In the inspected walls, signs of the corrosion of reinforcement embedded were observed in carbonated concrete (in short time) and also in noncarbonated concrete. The characterization of the studied concretes indicated their low load resistance and a significant concentration of voids (with closed and or connected air bubbles) which were also present at concrete/reinforcement interfaces. As a consequence, the passivation of carbon steel may be impaired and the ingress of aggressive agents may be enhanced, resulting in a premature corrosion, especially in void regions. In experimental immersion tests, a major corrosion tendency of carbon steel immersed in simulated pore water solutions of air-entrained concretes than of an ordinary concrete has been clearly observed.

Keywords: air-entrained concrete, air bubbles, carbon steel, corrosion in voids, passivation, aqueous pores solution.

Resumo

Este artigo apresenta resultados de inspeções em campo e de ensaios de laboratório que apontaram a susceptibilidade à corrosão prematura de armaduras de aço-carbono de paredes de concreto leve moldadas no local. Nas paredes inspecionadas, observaram-se indícios de corrosão da armadura embutida em concreto não carbonatado e em concreto carbonatado (em curto intervalo de tempo). A caracterização dos concretos estudados apontou uma baixa resistência à compressão dos mesmos e uma concentração significativa de vazios (com bolhas de ar próximas e ou comunicantes), inclusive na interface concreto/armadura. Nestas

^a Mestre, pesquisadora do LCP - Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT (e-mail: aaaraujo@ipt.br).

^b Doutora em Ciências, Diretora de Inovação do IPT e professora convidada do Departamento de Metalurgia e Materiais da EPUSP (e-mail: zep@ipt.br).

^c Doutora em Ciências, Pesquisadora do Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC do IPT (e-mail: miriancr@ipt.br).

^{d,e} Técnicos metalurgistas do LCP - IPT (e-mail: davidr@ipt.br, albertojr@ipt.br).

condições, a passivação do aço-carbono pode ser prejudicada e o ingresso de agentes agressivos pode ser facilitado, implicando em uma corrosão prematura, especialmente na região de vazios. Em ensaios experimentais de imersão, pôde-se observar claramente uma maior tendência de corrosão do aço-carbono imerso em soluções simuladoras de água de poros de concretos leves, quando comparado com a de concreto convencional.

Palavras-chave: concreto com ar incorporado, bolhas de ar, aço-carbono, corrosão em vazios, passivação, solução aquosa de poros.

Introdução

Nas estruturas de concreto, não é raro observar a presença de problemas patológicos relacionados à corrosão das armaduras de aço-carbono. Esta corrosão é, principalmente, consequência do efeito do ambiente de exposição, como exemplo, a exposição à atmosfera rica em dióxido de carbono e ou à névoa salina (íons cloreto). Outros fatores relacionados à corrosão seriam: as características dos materiais empregados, as solicitações que as estruturas estão sujeitas ao longo dos anos de sua utilização e as usuais restrições de manutenções periódicas.

A presença de dióxido de carbono no concreto resulta na diminuição do pH da solução aquosa de poros do concreto para valores em torno de 9. Esse fenômeno é chamado de carbonatação e o seu avanço no concreto de cobrimento da armadura resulta na perda, generalizada, do filme de óxidos que mantém a armadura passivada.

O filme de óxidos passivante é formado a partir do contato do aço-carbono com a água rica em oxigênio dissolvido e em produtos alcalinos resultantes da hidratação do cimento [1]. Estudos em soluções simuladas dessa água, que fica contida nos poros do concreto, indicaram que o filme de óxidos tem espessura da ordem de 10 nm, sendo composto principalmente de magnetita (Fe_3O_4) [2]. A presença desse filme reduz a taxa de corrosão da armadura a níveis insignificantes ($< 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) [3, 4], o que justifica ser denominado de filme passivante.

Notoriamente há uma grande preocupação com a presença dos íons cloreto (Cl^-) na solução aquosa dos poros do concreto. Isso porque, esses íons quebram localmente o filme passivante, tendo-se a formação de pequenas cavidades, denominadas de pites. Com o avanço do ataque, a corrosão se generaliza, devido ao coalescimento dos pites já formados. As pesquisas mostram que a despassivação do filme na presença de íons cloreto é dependente da sua concentração e da relação com os íons hidroxila (OH^-) também presentes na solução aquosa de poros.

No presente trabalho, são apresentados resultados da avaliação da corrosão de armaduras de paredes estruturais de concreto leve com ar incorporado. A avaliação contemplou a realização de inspeções de unidades habitacionais e de ensaios de laboratório de corpos de provas preparados com amostras extraídas em campo. Cabe esclarecer que os concretos leves utilizados têm como especificação básica o uso de concretos convencionais, com característica de auto adensável, aos quais é adicionado, diretamente na betoneira, um aditivo incorporador de ar. Como resultado, há incorporação de bolhas de ar da ordem de 18 % no

concreto (massa específica por volta de 1800 kg/m^3). Na prática, tem-se um aumento, no caminhão betoneira, de 6 m^3 para cerca de 7 m^3 do volume do concreto. Cita-se que não há normalização nacional relativa para o concreto leve em estudo.

Corrosão em vazios

Independente do agente agressivo que induz a quebra da passivação (despassivação) da armadura, a corrosão da armadura em estruturas de concreto somente se iniciará na presença de água (eletrólito) e da disponibilidade de oxigênio dissolvido na mesma, sendo ambos conhecidos como fatores primários. Como fatores secundários, destaca-se a presença de frestas ou outro tipo de heterogeneidade geométrica na interface armadura/concreto [5, 6]. A prática mostra isso, pois, quase invariavelmente, a corrosão inicia-se nos local com presença de vazios na interface amadura/concreto [7, 8].

A corrosão ocorre, preferencialmente, nos vazios microscópicos em que a superfície da armadura pode ser umidificada com a solução aquosa de poros (efeito de capilaridade), ao contrário do que ocorre em vazios macroscópicos [9]. Nesse último, a corrosão tende a se limitar à região periférica do vazio, pois suas dimensões dificultam o acesso da água de poro em toda à área de vazio. De qualquer forma, independente do tamanho dos vazios, a sua presença torna mais porosa a estrutura do concreto o que facilita a penetração de íons cloreto, de oxigênio etc. [10].

O vazio funciona como uma célula oclusa: o anodo e o catodo encontram-se fisicamente separados, de modo que o eletrólito junto ao anodo tem dificuldade de misturar-se com o eletrólito junto ao catodo. Por esta razão, mesmo que no início do processo corrosivo, ambos os eletrólitos tenham as mesmas características, estas vão sofrendo alterações devido à formação dos produtos das reações anódica e catódica. Após algum tempo, os constituintes do eletrólito junto ao anodo são completamente diferentes do presente junto ao catodo [11].

Em resumo, nos vazios do concreto ocorre restrição do acesso da água de poro, enquanto que, na área adjacente, a armadura se mantém umidificada devido ao íntimo contato com a pasta de cimento/água de poro. A concentração distinta das soluções contidas nessas áreas (pH, oxigênio, relação Cl^-/OH^-), desencadeia uma corrosão generalizada ou localizada no vazio (anodo) onde ocorre à dissolução do metal e na área adjacente (catodo) a redução do oxigênio.

Métodos

Inspeção em campo

Foram inspecionadas paredes estruturais de concreto leve (100 mm de espessura) com idade inferior a três anos, em ambiente urbano. A inspeção teve como objetivo avaliar o estado da tela de aço da armadura (fios de aço-carbono de 3,6 mm de diâmetro), posicionada no centro da parede (em torno de 40 mm). Os ensaios realizados foram os seguintes:

- espessura do concreto de cobrimento da armadura: localização da armadura e determinação da profundidade de embutimento no concreto. Utilizou-se o equipamento Profoscope e, também, um paquímetro para determinação do cobrimento efetivo de armaduras;

- avaliação do concreto de cobrimento da armadura: determinação da profundidade da frente de carbonatação do concreto [12], medida da resistividade elétrica do concreto [13], determinação do teor de íons cloreto [14] em amostras coletadas em campo e caracterização petrográfica [15, 16];
- avaliação do estado da armadura: medida do potencial de corrosão de armaduras [17], após molhamento da superfície do concreto por longo período (2 h) em área delimitada da superfície das paredes e exame, a vista desarmada, de armaduras recém-expostas.

Utilizou-se o equipamento Canin para a medida da resistividade elétrica e do potencial de corrosão. Conforme descrito no manual desse equipamento [18], há um risco muito alto de ocorrência da corrosão na armadura quando os valores obtidos de resistividade são menores do que 8 k Ω .cm; o risco passa ser alto para valores entre 8 k Ω .cm e 12 k Ω .cm e, improvável, para valores maiores do que 12 k Ω .cm.

Segundo a ASTM C 876 [17], há aproximadamente 90 % de probabilidade de estado ativo de corrosão quando o valor de potencial obtido na armadura é mais negativo do que -350 mV, em relação ao eletrodo cobre/sulfato de cobre (ECSC), que é o eletrodo do equipamento Canin. Quando o valor obtido está entre esse valor e -200 mV (ECSC), a ocorrência de corrosão é incerta, ou seja, pode estar ocorrendo ou não. Entre -200 mV (ECSC) e 0 mV (ECSC) há aproximadamente 90 % de probabilidade de estado passivo.

Ensaios e análises de caracterização dos concretos em laboratório

Durante das inspeções, amostras dos dois concretos leves diferentes (AR1 e AR2) foram extraídas em campo para posterior realização de ensaios em laboratório. Definiu-se a realização de ensaio para a determinação da resistência à compressão do concreto [19] e do seu índice de vazios, de absorção de água e sua massa específica [20].

Adicionalmente, a microestrutura dos concretos leves AR1 e AR2 foi analisada por meio da determinação da concentração e do diâmetro das bolhas de ar incorporadas, com o uso do programa Scandium. Para tanto, foram confeccionadas lâminas delgadas do concreto, que foram impregnadas com resina epoxídica (sem recobrimento), a partir das quais foram realizadas as análises petrográficas. Essas mesmas lâminas foram utilizadas para a obtenção das imagens em microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 75 vezes. Para análise da região de interface concreto/armadura, amostras do concreto armado de algumas paredes inspecionadas foram coletadas e geradas imagens em microscópio óptico.

Ensaios experimentais de imersão em laboratório

Corpos de prova de concretos leves (AR1 e AR2) moldados em campo e de um concreto convencional (CV) moldado em laboratório foram utilizados para o preparo das seguintes soluções:

- **soluções SL1 e SL2**: suspensões que simulam a água de poro dos concretos leves (AR1 e AR2);
- **solução SL3**: suspensão de referência, que simula água de poro do concreto convencional (CV).

O preparo dessas consistiu da trituração dos concretos em britador e moinho de discos, até passarem totalmente na peneira de abertura 0,3 mm. O pó obtido de cada um deles foi misturado à água deionizada, sendo mantida a relação de 1:5 (90 g de pó para 450 g de água). Esta relação teve como objetivo manter reserva alcalina durante todo o ensaio. Com isso, seria evitada uma diminuição expressiva do pH em função da ação do gás carbônico atmosférico.

Após 24 h do preparo das soluções, período em que ocorreu decantação do pó de concreto, corpos de prova de aço-carbono jateados (AJ) foram imersos no sobrenadante. Ao longo dos ensaios, o pH e a temperatura do sobrenadante foram monitorados. O nível desse foi mantido com adição periódica de água destilada.

O preparo dos corpos de prova (AJ) consistiu do jateamento de barras nervuradas ($\varnothing$ 6.3 mm) e da proteção de suas extremidades com tinta epóxi. Além disto, para possibilitar a realização de medidas eletroquímicas, foi soldado um fio condutor de cobre na extremidade superior das barras. Esse fio e as extremidades das barras foram também protegidos com tinta epóxi. Um hidrofugante de alto desempenho também foi aplicado sobre a tinta epóxi com objetivo de evitar corrosão preferencial em eventuais frestas formadas entre a camada de tinta epóxi e a armadura. A área livre de exposição do aço-carbono a suspensões foi de 7.2 cm².

Quatro corpos de prova foram avaliados: três deles (números AJ1, AJ 2 e AJ3) destinados para a avaliação da passivação do aço-carbono e, o quarto (AJ4), especificamente para avaliação da corrosão em frestas, na tentativa de simular os vazios presentes no concreto leve: fora da fresta representando o contato íntimo da pasta de cimento com a armadura e dentro da fresta simulando a ausência desse contato. Seguindo recomendação normativa [21], usou-se um anel de Viton[®], posicionado ao centro deste corpo de prova, para a criação de regiões com frestas.

Os ensaios foram conduzidos durante 10 dias em ambiente laboratório, com condição climática controlada. O potencial de circuito aberto (E_{ca}) das barras foi monitorado com uso de um eletrodo de calomelano saturado (ECS). No início e no final dos ensaios, a densidade de corrente (i_{corr}) foi determinada por meio da técnica de resistência de polarização (R_p) (ver Figura 1). Esse parâmetro foi calculado a partir da curva de polarização experimental obtida na faixa de potencial de -10 mV a +10 mV, em relação ao E_{ca} , adotando a taxa de varredura de 0,1667 mV/s. A equação de Stern-Geary foi aplicada, sendo adotado nesta o valor de $B = 26$ mV para estado ativo de corrosão do aço-carbono e o valor de $B = 52$ mV para o estado passivo [22].

O estado da corrosão dos corpos de prova de aço-carbono foi considerado ativo quando da obtenção de valores de E_{ca} mais negativos que -291 mV, ECS e, o estado incerto de corrosão, para valores entre -291 mV, ECS e -141 mV, ECS [17]. Abaixo desse último, considerou-se estado passivo. Quando o valor da taxa de corrosão foi $\leq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, o nível de corrosão foi considerado desprezível, ou seja, considerou-se que a armadura estava passiva. Valores superiores a esse foram considerados como indicativos de um estado ativo de corrosão, sendo que, o nível de corrosão foi considerado baixo para valores entre $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, moderado para valores acima de $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ até $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e elevado para valores acima de $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [4].

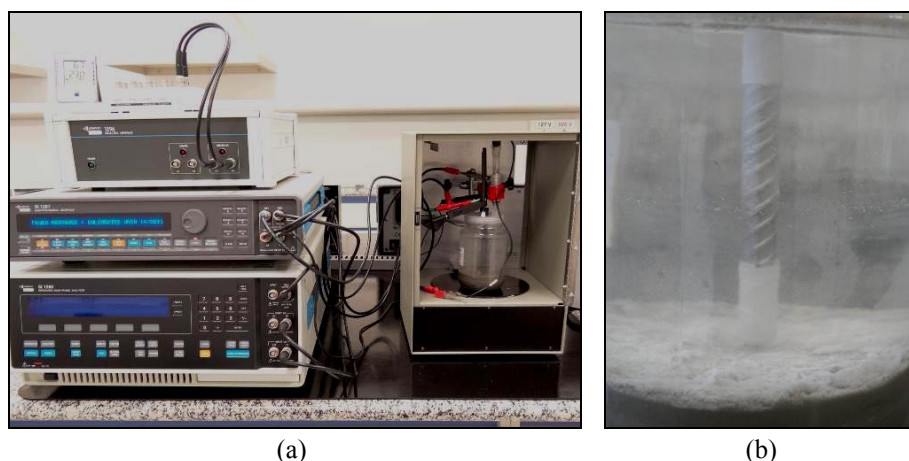


Figura 1 – Ensaaios eletroquímicos em corpo de prova imerso na solução aquosa de poros (a) e detalhe da imersão do corpo de prova no sobrenadante da solução (b).

Resultados

Resultados de inspeção em campo

A determinação da espessura do concreto de cobrimento da armadura (tela eletrossoldada) das paredes inspecionadas indicou a variação do seu posicionamento em relação ao definido em projeto (posicionamento central). Em algumas das paredes, era bastante significativo o deslocamento do posicionamento da armadura (superior a 20 mm), fato que determinou uma baixa espessura de cobrimento em uma das faces da parede e cobrimento alto na face oposta.

O ensaio de carbonatação mostrou um rápido avanço da frente de carbonatação em ambas faces das paredes inspecionadas (superior a 15 mm na idade de aproximadamente três anos). Mesmo nesta condição, na maioria das vezes, o concreto da região de posicionamento da armadura não estava carbonatado.

A frente de carbonatação somente atingia as armaduras que estavam deslocadas mais de 20 mm do posicionamento central definido em projeto. Para estas, o exame visual indicou a despassivação da armadura, tendo a superfície das mesmas manchas, predominantemente, de coloração preta e castanho-alaranjada, em tons intensos. Em alguns casos, era ainda nítido o acúmulo de produtos de corrosão. A Figura 2 ilustra o exposto.

Nas armaduras embutidas em concreto íntegro, ou seja, não carbonatado e sem presença de anomalias na sua superfície, o exame visual indicou, em geral, o seu estado passivo. A superfície recém-exposta da armadura apresentava coloração típica do aço-carbono passivado: coloração acinzentada. No entanto, em algumas armaduras, mesmo embutidas em concreto não carbonatado, foram observados trechos com manchas indicativas de despassivação do aço-carbono. As manchas estavam presentes em regiões aleatórias ao longo da superfície do aço-carbono e em locais de sobreposição dos fios da tela e de amarrações. As Figuras 3 a 5 ilustram o exposto.

Quanto às medidas da resistividade elétrica do concreto e do potencial de corrosão, foram obtidos valores muito variáveis. No entanto, a grande maioria dos valores da resistividade foram superiores a 50 k Ω .cm, indicando baixo risco de ocorrência de corrosão, enquanto, a grande maioria dos valores de potencial de corrosão foram mais positivos do que -100 mV (ECSC), indicando o estado passivo da armadura. Esses resultados não foram considerados válidos, pois era evidente a corrosão da armadura, especialmente nas paredes em que se constatou que a frente de carbonatação atingia a armadura.

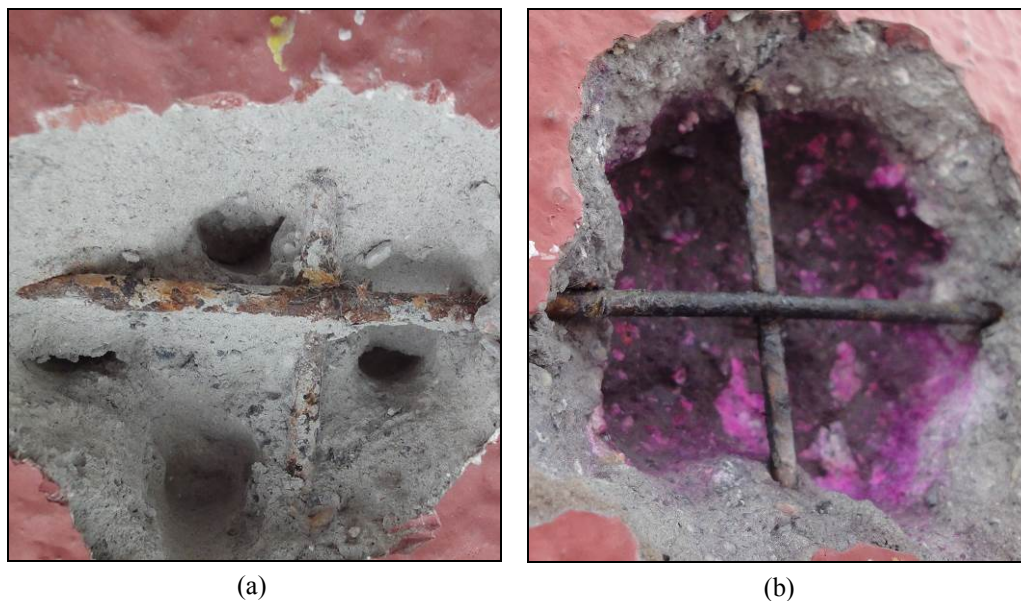


Figura 2 - Manchas pretas e castanho-alaranjadas, indicando corrosão da armadura no meio (a) e, após ensaio de carbonatação, verificação do avanço da carbonatação, atingindo a armadura (superfície sem coloração) (b).

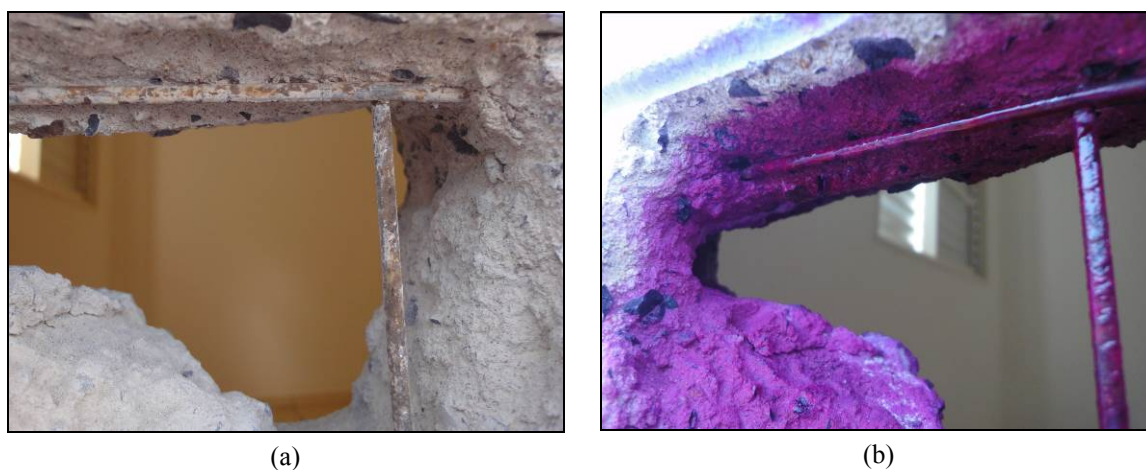


Figura 3 - Manchas pretas e castanho-alaranjadas, indicando a despassivação da armadura recém-exposta e, após ensaio de carbonatação, verificação que o concreto da região de embutimento da mesma armadura não estava carbonatado (superfície de coloração rósea) (b).

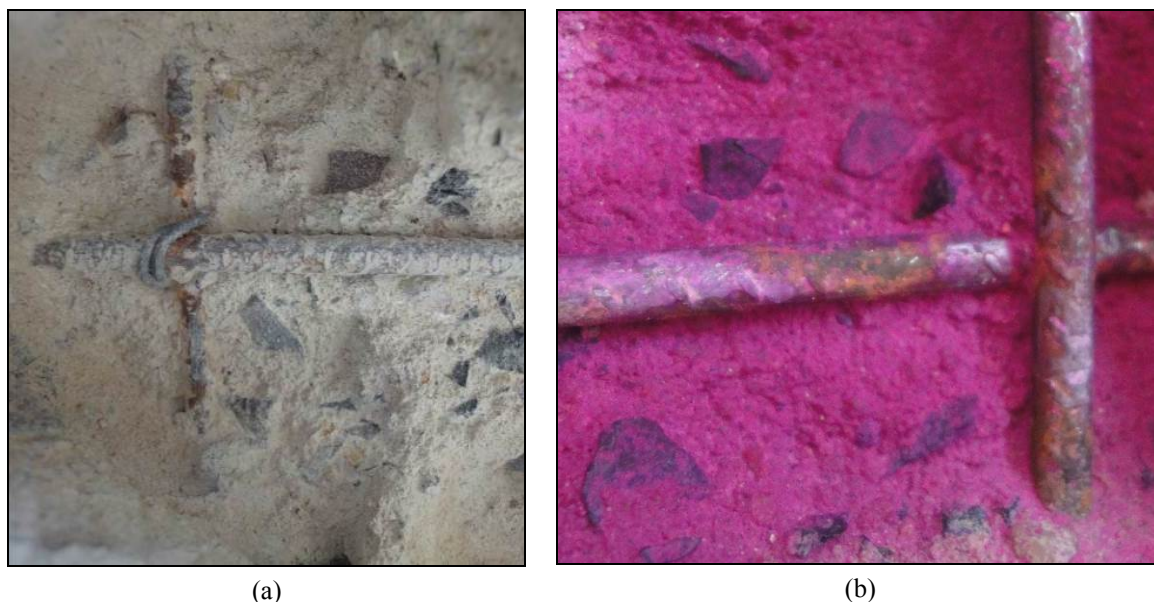


Figura 4 - Armadura recém-exposta, estando parte de sua superfície com manchas de coloração predominantemente acinzentada, indicando passivação no meio e, outra parte da sua superfície com manchas de coloração preta e castanho-alaranjada, indicando despassivação (a). Detalhe de outra armadura com as mesmas manchas na armadura embutida em concreto não carbonatado. A fraca presença de coloração rósea nas áreas de coloração preta e castanho-alaranjada reforça a indicação da despassivação em área localizada da superfície da armadura exposta (b).



Figura 5 - Armadura recém-exposta com manchas de coloração preta e castanho-alaranjada em áreas localizadas da superfície (incluindo a intersecção dos fios), indicativas de despassivação (a). Após ensaio de carbonatação, indicação de que a região de embutimento da armadura não estava carbonatado (superfície de coloração rósea) (b).

Resultados dos ensaios de caracterização dos concretos em laboratório

A Tabela 1 apresenta a dosagem e as características dos concretos leves (AR1 e AR2). A Tabela 2 apresenta as características petrográficas dos concretos AR1 e AR2 e concentração dos componentes e vazios em relação à área analisada. As Figuras 6 e 7 apresentam as imagens obtidas a partir de lâminas dos concretos, as quais foram utilizadas na determinação da concentração e do diâmetro dos vazios, apresentado na Figura 8. As Figuras 9, 10 e 11 apresentam imagens de amostras de concreto fraturado.

Pela Tabela 1, pode-se observar a similaridade de dosagem dos concretos, no entanto, difere-se no tipo de cimento e na relação de água/cimento (a/c), esta última mais alta em comparado a estabelecida (0,60) para concreto convencional exposto ao ambiente urbano [23]. Os resultados de caracterização refletiram a composição distinta do concreto leve em relação ao convencional, sendo obtida uma massa específica e resistência à compressão baixa.

Pelas Figuras 6 e 7 e, também pela Figura 9, pode-se visualizar claramente a presença elevada de bolhas de ar nos concretos AR1 e AR2. Conforme mostram essas figuras, as bolhas de ar têm dimensão bem variada e distribuição não uniforme no concreto. Além disto, algumas bolhas estão muito próximas e estão interconectadas (porosidade aberta), o que facilita o ingresso de agentes no concreto de cobrimento da armadura. Pelas Figuras 10 e 11 pode-se observar a presença de vazios na interface concreto/armadura, gerados pela concentração das mesmas bolhas na superfície da armadura, prejudicam a sua passivação.

Os resultados de caracterização petrográfica (Tabela 2) também mostraram uma concentração elevada de vazios, tendo o concreto AR1 em torno de 20 % a 25 % e o concreto AR2 em torno de 20 %. Além disso, essa análise mostrou que além da presença de bolhas de ar incorporado (intencionais) e de ar aprisionado (causados pelo processo de adensamento), há vazios na interface pasta/agregado e, para o AR2, vazios sem forma definida (causa variável).

No concreto AR1, Figura 6, pode-se visualizar a presença de bolhas de dimensões maiores do que no concreto AR2, Figura 7. No entanto, no concreto AR2, há também vazios sem uma forma definida. No gráfico (Figura 8), pode-se observar que a maioria das bolhas de ar tinha diâmetro menor do que de 300 μm em ambos os concretos, no entanto, havia bolhas de diâmetros maiores, inclusive de 500 μm . Alguns destas de diâmetros maiores são possivelmente resultantes da união de bolhas de ar. A faixa predominante de bolhas é de em torno de 40 μm a 140 μm para o concreto AR1 e de 20 μm a 100 μm para o concreto AR2.

Tabela 1 – Dosagem e características dos concretos leves (AR1 e AR2)

Dados		Norma	AR1		AR2	
			Traço	Características	Traço	Características
Dados fornecidos em campo	Água	-	185 L	Relação água/cimento = 0,66	185 L	Relação água/cimento = 0,71
	Aditivo incorporador de ar	ABNT NBR EB 1763 (1992)	0,5 L	Aditivo incorporador de ar à base de sabão de breu, 0,18 % em relação à massa de cimento.	0,5 L	Aditivo incorporador de ar à base de sabão de breu, 0,19 % em relação à massa de cimento.
	Agregado miúdo	ABNT NBR NM 248 (2003)	943 kg	-	839 kg	-
	Agregado graúdo		725 kg	-	796 kg	-
	Cimento	ABNT NBR 11578 (1997)	280 kg	CP IV 32	260 kg	CP II E 40
	Fibra	-	0,3 kg	Microfibra de polipropileno de 18 mm de comprimento e 12 µm diâmetro	0,2 kg	Microfibra de polipropileno de 18 mm de comprimento e 12 µm diâmetro
Dados obtidos em ensaios	Resistência à compressão axial	ABNT NBR-5739 (2007)	6,5 MPa		6,2 MPa	
	Índice de vazios	ABNT NBR 9778 (2009)	37,5 %		36,8 %	
	Massa específica real		1730 kg/m³		1650 kg/m³	
	Absorção de água		22,7 %		22,4 %	

Tabela 2 – Características petrográficas dos concretos leves (AR1 e AR2) e teor estimado dos componentes e vazios em relação à área analisada

Composição	AR1	AR2
Pasta	Distribuição homogênea de cor: marrom clara. Teor estimado: 10 %	Distribuição homogênea de cor: marrom clara. Teor estimado: 10 %
Agregado miúdo	Areia natural: grãos arredondados e subarredondados, esfericidade moderada a alta. Brita fina: grãos angulosos a subangulosos, esfericidade baixa. Tamanho: 0,1 mm a 1,5 mm, predomínio areia média. Distribuição homogênea, sem orientação preferencial. Predomínio: quartzo (areia); basalto e calcário (brita). Teor estimado: 15 % a 20 %	Areia natural: grãos angulosos a subangulosos. Tamanho: 0,1 mm a 2,5 mm, predomínio areia média. Distribuição homogênea, sem orientação preferencial. Predomínio: quartzo, raro feldspato Teor estimado: 20 %
Agregado graúdo	Dimensão aproximada do maior grão: 1,0 cm. Tipo: brita. Predomínio: basalto (50 %), rocha carbonática (35 %), siltito (10 %), argilito (5 %): Forma: alongada e angulosa. Aderência com a pasta: boa. Teor estimado: 50 %	Dimensão aproximada do maior grão: 1,0 cm. Tipo: brita. Predomínio: basalto amigdaloidal (amígdalas preenchidas por argilomineral verde). Forma: os agregados são angulosos, lamelares ou alongados. Aderência com a pasta: baixa. Teor estimado: 50 %
Vazios	Bolhas: ar aprisionado e ar incorporado. Vazios: interface pasta/agregado. Microfissuras: na pasta (raras). Teor estimado: 20 % a 25 %	Bolhas: ar aprisionado e ar incorporado. Vazios: interface pasta/agregado e sem forma definida (ausência de pasta). Teor estimado: 20 %

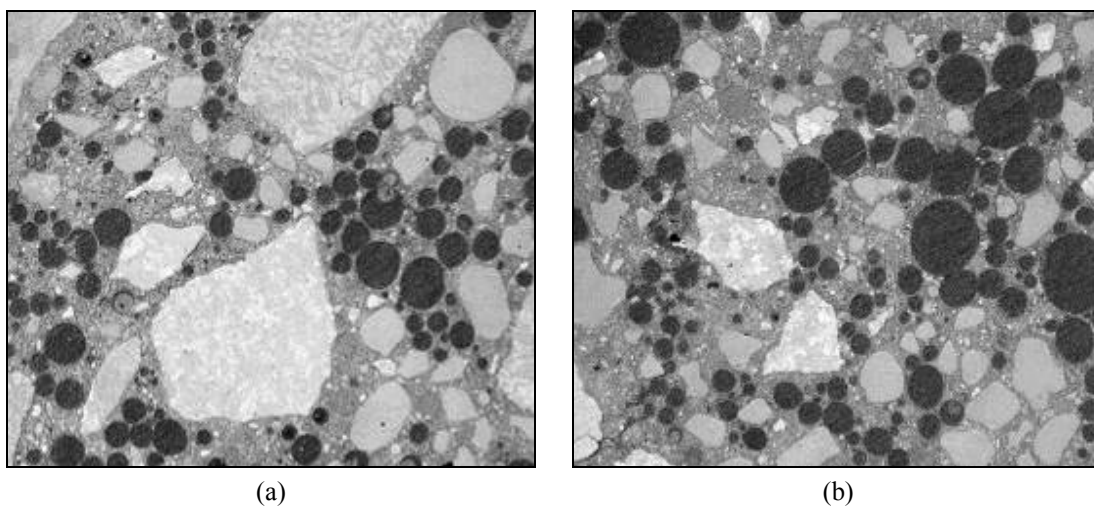


Figura 6 – Seção polida do concreto leve de ar incorporado AR1, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas). (a) (b).

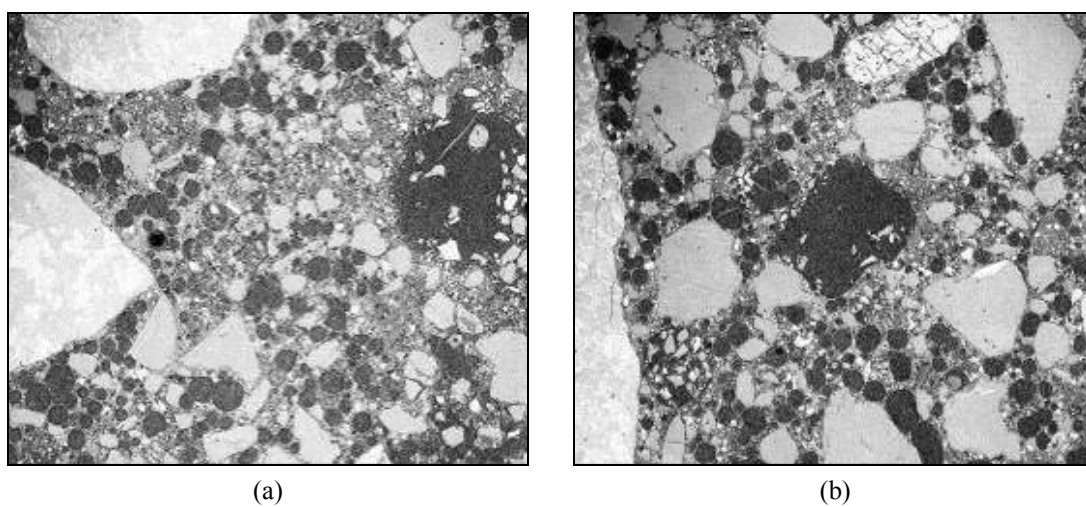


Figura 7 – Seção polida do concreto do concreto de ar incorporado AR2, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas). (a) (b).

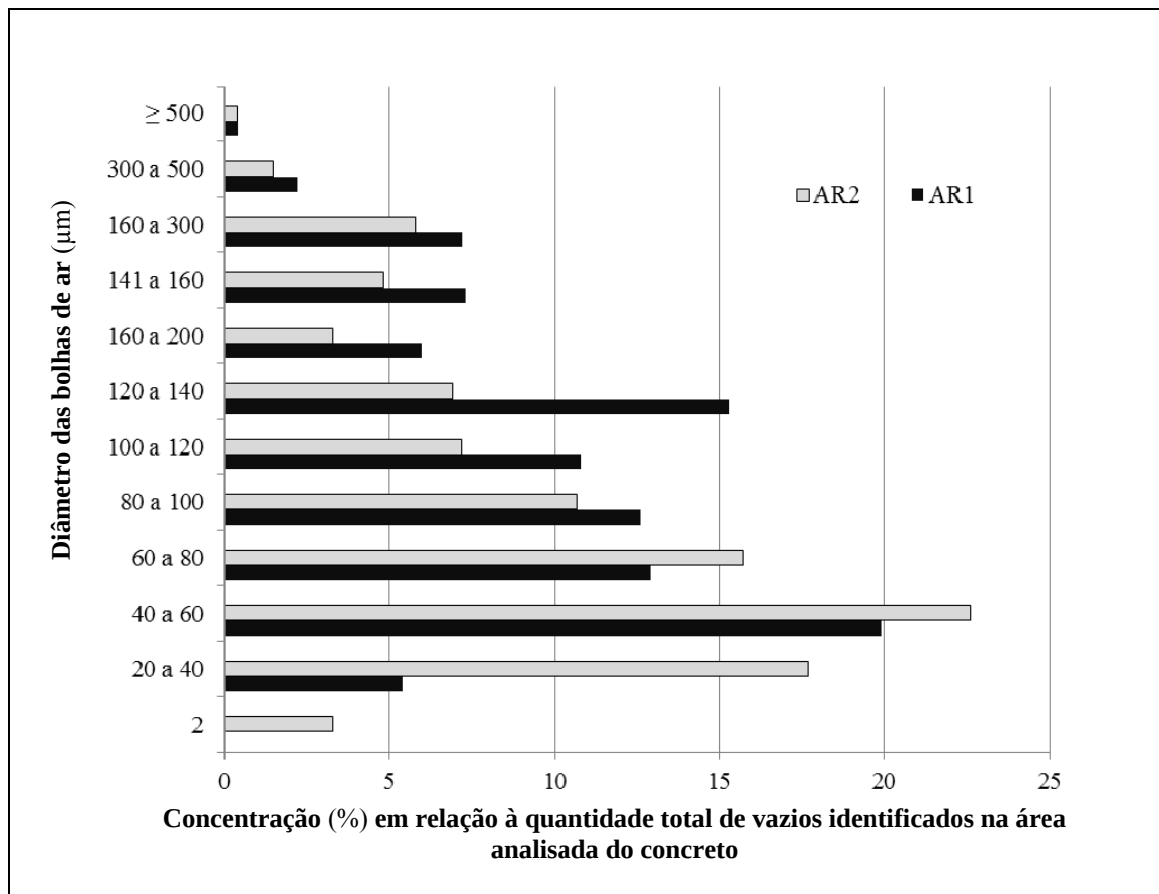
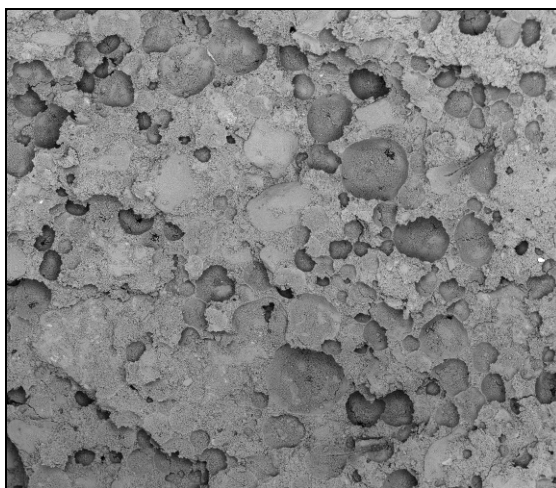
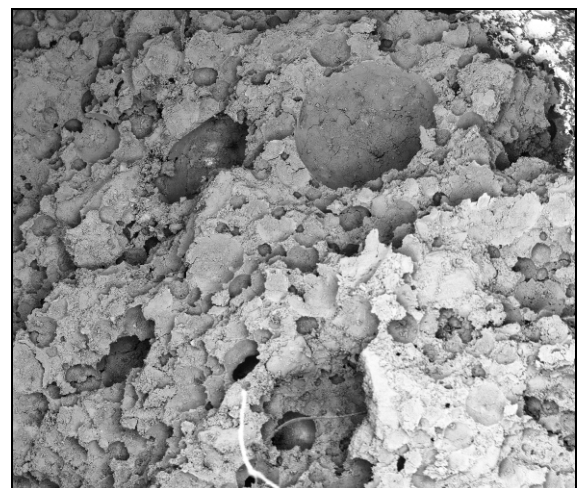


Figura 8 – Gráfico de concentração e do diâmetro das bolhas de ar nos concretos AR1 e AR2



(a)



(b)

Figura 9 – Concreto leves fraturados AR1 (a) e AR2 (b). Em ambas pode-se visualizar a presença de vazios, característicos da formação de bolhas de ar. As bolhas de ar têm dimensões variáveis, algumas delas estão próximas ou são comunicantes. No concreto AR2 (b) há áreas vazias de maior dimensão, devendo as mesmas ser resultantes da etapa de lançamento e assentamento do concreto.

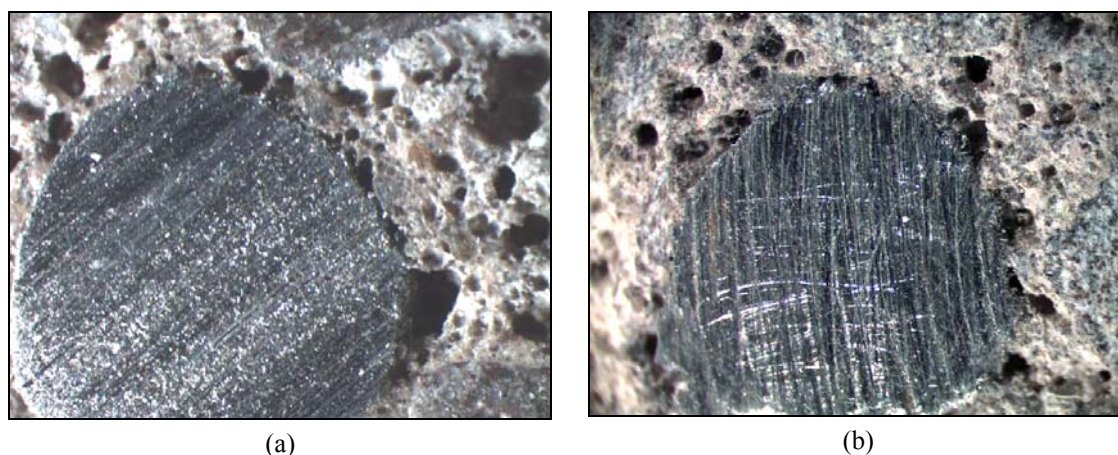


Figura 10 – Interface concreto/armadura, mostrando a concentração de vazios (a) (b).

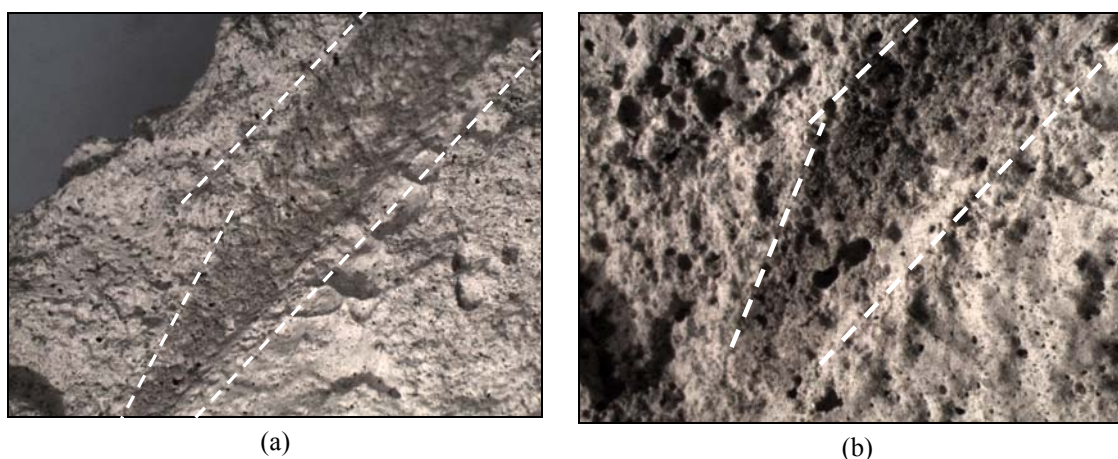


Figura 11 – Região do concreto em que a armadura estava embutida (indicada por linhas brancas pontilhadas) (a) e detalhe do mesmo local, mostrando a concentração de vazios (b).

Resultados dos ensaios experimentais de imersão em laboratório

A Figura 12 apresenta os resultados dos valores de potencial de circuito aberto (E_{ca}) em função do tempo decorrido para os corpos de prova (AJ1, AJ2, AJ3 e AJ4) imersos nas três soluções em estudo (SL1, SL2 e SL3). Nesta Figura, está indicado, por diferentes colorações, a probabilidade de ocorrência de corrosão. A Tabela 3 complementa a Figura 12, apresentando os resultados de densidade de corrente (i_{corr}), de velocidade de corrosão (V_{corr}) e de exame visual, no início e ao término dos ensaios. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos de análise química das soluções, os valores de pH e de temperatura no início e ao término dos ensaios.

Pela Figura 12, pode-se observar uma pequena oscilação do E_{ca} ao longo do ensaio em todas as soluções, com exceção dos corpos de prova AJ2 e AJ4 (com anel simulando vazios) imersas na solução SL2. Durante o ensaio nessa solução, ocorreu uma oscilação significativa para esses dois corpos de prova, sendo obtidos valores indicativos de estado ativo de corrosão (região vermelha na figura). Ao término do ensaio, somente o corpo de prova AJ2 manteve

um estado ativo de corrosão (-498 mV, SCE). O aspecto desse corpo de prova bem como a sua elevada densidade de corrente ($i_{\text{corr}} = 29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) mostrados na Tabela 3 confirma o seu estado ativo de corrosão. Nesse exame, foi determinada a área de corrosão, sendo o valor da densidade apresentado na Tabela 3 o valor corrigido, considerando apenas esta área e não toda a área livre do corpo de prova.

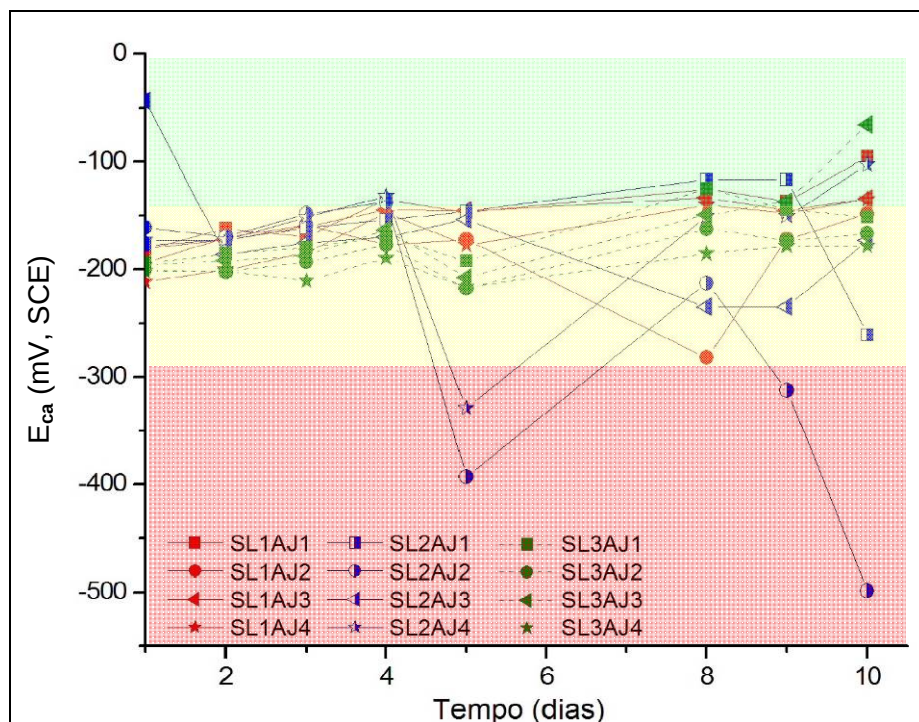


Figura 12 – Gráfico de monitoramento do E_{ca} nos corpos de prova AJ nas três soluções

■ > 90% de probabilidade de estado passivo

■ Corrosão incerta

■ > 90% de probabilidade de estado ativo de corrosão

Os demais corpos de prova, em todas as soluções, apresentaram ao longo dos ensaios valores de E_{ca} acima da região vermelha, no entanto, muitos deles mantiveram ao longo dos ensaios valores mais negativo do que -141 mV (SCE) (região amarela da figura), indicando corrosão incerta. Os valores finais de corrente (Tabela 3) indicaram um grau de corrosão baixo para esses corpos de prova, estando os mesmo passivados.

O exame visual dos corpos de prova (Tabela 3) ao término dos ensaios confirmou o estado ativo de corrosão dos corpos de provas AJ2 e AJ4 (SL2). Esta corrosão ocorreu sob o hidrofugante e o anel, ambas típicas de corrosão em fresta, e, também, em área livre da superfície exposta do aço. Nos outros corpos de prova, expostos na mesma solução, o exame visual mostrou uma corrosão incipiente sob o hidrofugante. Nesta condição, é esperado que os valores de potencial indicassem um estado incerto ou passivo do aço exposto à solução, fato ocorrido. A corrosão tanto sob o anel como sob o hidrofugante também foi observada para os corpos de prova imersos na solução SL1. Na solução SL3, somente o aço AJ4 apresentou corrosão sob o hidrofugante, bem como sob o anel. Ressalta-se que embora a presença de corrosão nas extremidades dos corpos de prova não fosse esperada durante a realização desses

ensaios experimentais, a sua ocorrência contribuiu para diferenciar o comportamento dos concretos.

Pela Tabela 4, pode-se verificar que todas as soluções possuíam praticamente o mesmo valor de pH (em torno de 12,4), tendo-se uma diminuição discreta de seu valor até o término dos ensaios. No entanto, essa diminuição resultou no aumento da relação Cl^-/OH^- . A solução SL2 foi a apresentou a maior aumento dessa relação e, ainda, o menor valor de cálcio e o maior valor de cloretos. Tais características devem estar relacionadas à corrosão mais intensa nos corpos de prova imersos nessa solução.

Tabela 3 – Medidas eletroquímicas e exame visual

Solução /aço	Rp (ohm.cm ²)		i _{corr} (μA/cm ²)		V _{corr} (μm/ano)		Exame visual
	1 dia	10 dias	1 dia	10 dias	1 dia	10 dias	Aspecto após 10 dias
SL1/AJ1	4,7x10 ⁵	4,7x10 ⁵	0,110	0,110	1	1	Corrosão localizada sob o hidrofugante
SL1/AJ2	1,2x10 ⁶	1,2x10 ⁶	0,044	0,045	1	1	
SL1/AJ3	3,5x10 ⁵	3,6x10 ⁵	0,150	0,014	2	2	
SL1/AJ4	Corrosão localizada sob o anel.						
							
SL2/AJ1	6,9x10 ⁵	2,1x10 ⁵	0,075	0,240	1	3	Corrosão localizada sob o hidrofugante
SL2/AJ2	5,6x10 ⁵	8,9x10 ²	0,093	29	1	342*	Corrosão severa na área livre do aço exposto e sob o hidrofugante 
SL2/AJ3	3,2x10 ⁴	4,5x10 ⁵	1,600	0,110	2	1	Corrosão localizada sob o hidrofugante 
SL2/AJ4	Corrosão na área livre do aço exposto e sob o anel e o hidrofugante						
							
SL3/AJ1	4,9x10 ⁵	4,4x10 ⁵	0,110	0,180	1	1	Sem sinal de corrosão
SL3/AJ2	6,7x10 ⁵	6,8x10 ⁵	0,078	0,076	1	1	
SL3/AJ3	7,5x10 ⁵	2,0x10 ⁵	0,069	0,250	1	2	
SL3/AJ4	Corrosão sob o hidrofugante e sob o anel						
							

* Taxa de corrosão corrigida: considerou-se apenas a área corroída e não a área total do corpo de prova

Tabela 4 – Análise química e valor da relação Cl^-/OH^-

Solução	Cálcio (Ca^{2+}) (mg/L)	Cloroeto (Cl^-) (mg/L)	pH	Cl^-/OH^- (mg/L)	pH	Cl^-/OH^- (mg/L)
	Inicial				Final	
SL1	$0,21 \pm 0,01$	$4,5 \pm 0,2$	12,4	0,01	11,7	0,05
SL2	$0,11 \pm 0,01$	$6,7 \pm 0,4$	12,2	0,02	11,7	0,08
SL3	$0,25 \pm 0,01$	$2,4 \pm 0,2$	12,2	0,01	11,7	0,03

Discussão

Os resultados de inspeção em campo indicaram um avanço significativo da frente de carbonatação (acima de 15 mm) no concreto de paredes estruturais moldadas no local, em período inferior a três anos. Esse avanço é superior aos usualmente verificados em concreto convencional, considerando idade e ambiente de exposição (ambiente urbano) equivalentes. Como referência prática, cita-se a profundidade de 10 mm após 15 anos para concreto convencional de boa qualidade.

O avanço da carbonatação atingia as armaduras que não estavam posicionadas na profundidade especificada em projeto, especialmente aquelas com deslocamento elevado. O exame visual dessas armaduras mostrou indícios de despassivação, condição usualmente verificada quando há o abaixamento do pH do concreto (carbonatação). No caso das armaduras posicionadas corretamente, na maioria das vezes, o exame visual indicou o seu estado passivo. No entanto, em alguns dos locais de exposição de trecho da armadura, puderam-se observar manchas indicativas de sua despassivação. Em algumas delas, havia acúmulo de produtos de corrosão, indicando que este processo estava em curso.

Uma possível explicação para a despassivação dessas armaduras seria a sua utilização com processo corrosivo em curso, o que dificulta a sua passivação no meio [24]. Cita-se que, apesar de não ser recomendado, o uso de armaduras corroídas é uma prática comum. No entanto, usualmente, em concreto convencional, o contato íntimo da armadura corroída com a pasta de cimento é capaz de promover a passivação de grande parte da sua superfície. No caso dos concretos leves em estudo, a verificada concentração de vazios dificulta o acesso da solução aquosa à armadura, retardando a sua ação protetiva. Além disto, a porosidade elevada dos concretos leves acelera o ingresso de agentes (gás carbônico) no concreto de cobrimento da armadura, fato verificado nos estudos.

Estando a armadura despassivada nos vazios, um estado ativo de corrosão pode ser sustentado devido à formação de células oclusas entre o vazio e a área adjacente ao mesmo. A corrosão pode ser mantida pela diminuição do pH da solução contida no vazio, tanto pelo maior acesso do dióxido de carbono como pela menor disponibilidade de compostos alcalinos presentes na região. Com a redução do pH da solução aquosa presente nos vazios, há um aumento da relação Cl^-/OH^- , tornando o meio mais agressivo.

Estudos mostram que a eficiência de proteção do filme passivante é diminuída quando a relação Cl^-/OH^- é reduzida [25-27]. No entanto, não há um único limite dessa relação para a corrosão ser desencadeada [25], sendo a tolerância maior em concreto que há um íntimo contato do filme passivante com produtos hidratados da pasta de cimento [28]. A tolerância é menor quando da presença de vazios e outras heterogeneidade, as quais interrompem o contato do filme passivante com a pasta de cimento [28]. Outros fatores que contribuem na eficiência do filme passivante são a umidade do concreto, o tipo de cimento e a relação a/c do concreto de cobrimento da armadura [25].

Estudos apontam que a corrosão é mais intensa na parte inferior das armaduras horizontais que é um local de concentração de vazios, bem como as regiões de intersecção de barras e de fixação de arames. A corrosão na parte inferior da armadura foi verificada em estudo de Soylev e Francois [29], sendo obtidas taxas de corrosão mais elevadas na armadura embutida em concreto de maior porosidade (maior relação a/c). Alhozaimy e colaboradores [30] também atribuíram à maior porosidade a obtenção de taxas de corrosão mais elevadas em região de intersecção de fios e de fixação de arames de amarração. Horne e colaboradores [31] observaram que, em concreto de maior relação a/c, ocorre uma maior exsudação da água de amassamento o que reduz a quantidade de hidróxido de cálcio (composto da pasta de cimento) junto à armadura, tendo-se a formação de vazios. Eles argumentam ainda que esse composto possa conferir maior proteção contra a carbonatação, retardando a queda local do pH da solução presente na interface concreto/armadura.

No presente estudo, ambos os concretos leves estudados foram especificados com uma relação a/c alta, o que impactou na resistência à compressão de ambos que foi muito baixa (na ordem de 6 MPa). A ABNT NBR 8953 [32] define para concreto leve (massa específica $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$) a resistência mínima de 20 MPa para concretos estruturais e de 10 MPa para concretos não estruturais.

Segundo estudo de Khedr e colaboradores [33], perdas insignificantes de resistência à compressão do concreto leve (utilizado no exterior devido a sua resistente a ciclos de congelamento e degelo) se limitam àqueles em que há incorporação de ar somente entre 5 % a 7 %. No presente estudo, é desejável a incorporação de ar nos concretos leve muito maior (da ordem de 18 %). Cabe salientar que não há normalização brasileira com restrição desses valores para concreto leve com características estruturais.

Tanto a incorporação elevada de ar como a relação a/c especificada para os concretos leves impactaram nos demais resultados dos ensaios de caracterização. Os valores obtidos de índice de vazios (em torno de 37 %) e de absorção de água (em torno de 22 %) foram bem superiores aos usualmente obtidos em concreto convencional. Costuma-se considerar que o concreto é de boa qualidade, quando os valores de absorção à água estão bem abaixo de 10 % [34].

A análise das características petrográficas mostrou a presença significativa de vazios e, a análise das imagens, a distribuição não uniforme das bolhas de ar incorporado, tendo-se bolhas muito próximas ou comunicantes. O diâmetro das bolhas de ar foi variável, tendo a sua maioria diâmetro menor do que de 300 μm . Considerando que a permeabilidade do concreto é função da porosidade, especialmente das dimensões, distribuição e continuidade dos vazios

[34], o arranjo visualizado das bolhas nos concretos leves em estudo deve comprometer a durabilidade das paredes estruturais.

No exterior, é requerido que o uso de aditivo incorporador de ar resulte na formação de bolhas de ar de diâmetro da ordem de 50 μm , as quais são “cavidades descontínuas na pasta de cimento de modo que não se formam canais para a passagem da água e não aumenta a permeabilidade do concreto” [34]. Segundo o ACI 212.3R [35], as bolhas devem ser menores do que 100 μm , sendo sua quantidade e distribuição dependentes de diferentes fatores, especialmente da natureza e quantidade do aditivo utilizado, do tipo e duração da mistura, da consistência do concreto e do tipo e grau de consolidação do concreto.

Quanto aos resultados obtidos em campo da resistividade elétrica do concreto e do potencial de corrosão das armaduras, estes não foram considerados válidos. A concentração elevada de bolhas de ar, associado ao baixo diâmetro da armadura (3,6 mm) e ao seu embutimento em profundidade considerável (em torno de 40 mm) afetaram as leituras, que não corresponderam ao estado ativo verificado pelo exame visual.

Nos ensaios experimentais de imersão, pôde-se observar claramente uma maior tendência de ocorrência de corrosão nos corpos de prova imersos nas soluções simuladoras de água de poros dos concretos leves, em comparação com a solução obtida com um concreto representativo dos usualmente aplicados em construções convencionais. Esse resultado mostrou a importância de uma melhor investigação dos componentes dos concretos leves e sua dosagem, bem como da sua capacidade de proteção contra corrosão de armaduras de aço-carbono. A solução AR2 foi a que apresentou maior suscetibilidade à corrosão, tendo-se corrosão generalizada em área livre da superfície dos corpos de prova, além de corrosão sob o anel e nas extremidades dos corpos de prova.

Conclusões

Este trabalho mostra que a passivação e a corrosão de armaduras de aço-carbono são fenômenos bastante complexos em meio heterogêneo como o concreto, podendo haver diferenças significativas de comportamento de armaduras embutidas em concreto leve com ar incorporado em relação às usualmente verificadas para o concreto convencional.

Com base nos resultados obtidos no estudo e na experiência dos autores na avaliação da corrosão em estruturas de concreto, conclui-se que as características do concreto leve influenciaram negativamente na capacidade do aço-carbono de se passivar no meio e assim se manter por longo período de exposição ambiental. Com isto, é importante o acompanhamento do desempenho das paredes estruturais inspecionadas e a condução de estudos detalhados das propriedades do concreto leve e de seu desempenho, incluindo o estudo de medidas de proteção superficial da armadura.

Dentre os resultados obtidos, destaca-se o exame visual de armaduras recém-expostas de paredes estruturais de concreto leve. Esse exame evidenciou claramente a corrosão prematura da armadura. Indícios de corrosão foram detectados em armadura embutida em concreto carbonatado e, também, em concreto íntegro. No concreto íntegro, manchas indicativas de corrosão foram visualizadas em regiões de sobreposição dos fios da tela da armadura e de

fixação de amarrações e, muitas vezes, em regiões aleatórias ao longo da superfície da armadura.

Os ensaios de caracterização foram adequados para complementar à avaliação feita em campo dos concretos leves. Os concretos executados apresentaram resistência à compressão bem inferior ao mínimo exigido para o concreto convencional. Além disto, constatou-se uma elevada presença de bolhas de ar, inclusive na interface armadura/concreto. Tais características foram consideradas decorrentes da elevada incorporação de ar no concreto e relação a/c.

A alta porosidade dos concretos leves estudados, associada ao uso de armaduras previamente corroídas, justifica os indícios de corrosão constatados na sua superfície. Os locais de falha (nos vazios) de seu contato com a pasta de cimento são propícios à corrosão. A corrosão pode ser desencadeada pela formação de células oclusas formadas nas regiões de concentração de vazios, bem como pode ocorrer de forma generalizada, haja vista o ingresso de agentes no concreto de cobrimento da armadura ser facilitado em concreto poroso.

Agradecimentos

Andreza A. Gouveia Milham pela recuperação de artigos.

Referências bibliográficas

- [1] VERBECK, G.J. Corrosion of Metals in Concrete In: Corrosion of Metals in Concrete. **SP 49-4**. American Concrete Institute. Special Publication. v. 49, p. 39-46, 1975.
- [2] HUET, B.; HOSTIS, H.L.; MISERQUE, F.; IDRISSE, H. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. **Electrochimica Acta**.v.51, p. 172-180, out., 2005.
- [3] ANDRADE, C.; ALONSO, C. RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring corrosion: test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures/Matériaux et Construction**, v.37, p. 623-643, nov., 2004.
- [4] GONZÁLEZ, J.A.; MIRANDA, J.M.; FELIU, S. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. *Corrosion Science*, v.46, p. 2467-2485, 2004.
- [5] GONZÁLEZ, J.A.; FELIU, S.; RODRÍGUES, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete-Part 1: when, how and how much steel corrodes. *Materials and Structure/Matériaux et Construction*, v. 29, p. 40-46, jan., 1996.
- [6] GONZÁLEZ, J.A.; OTERO, E.; FELIU, S.; LÓPEZ, W. Initial steps of corrosion in the steel/Ca(OH)₂ + Cl⁻ system: the role of heterogeneities on the steel surface and oxygen supply. **Cement and Concrete Research**. V.23, p. 33-40, 1993.

-
- [7] PAGE, C. L. The mechanisms of corrosion protection in reinforced concrete marine structures. **Nature**, v.11, p. 514-515, dez., 1975.
- [8] NAM, J.; HARTT, W.H.; KIM, K. Time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete specimens as affected by cement alkalinity and bar surface condition. **Proceeding...Corrosion 2005**. (Paper 05256).
- [9] ANGST, U; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, O.; ELSNER, B. Influence of Casting Direction on Chloride-Induced Rebar Corrosion. Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading. **Proceedings...the 6th International Conference on Concrete Under Severe Conditions (CONSEC'10)**, Merida, Yucatan, Mexico, 2010.
- [10] MACDONALD, D.D; MICHAEL, C., MCKUBRE, H; URQUIDI-MACDONALD, Theoretical assessment of Ac impedance spectroscopy for detecting corrosion of rebar in reinforced concrete. **Proceeding...Symposium on corrosion of metals in concrete**. NACE. p. 30-41, 1987.
- [11] PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. 2v., v.1, cap. 6. 280p.
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14630**: products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, English version, DIN. Berlin, 2007. 10p.
- [13] POLDER, R. D. Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete. RILEM TC 154-EMC technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 603-611, dez., 2000.
- [14] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM C 1218/C 1218M**: Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2008. 3p.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7389**: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. ABNT. Rio de Janeiro. 1992. 7p.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 856**: Standard practice for spectrographic examination of hardened. Pennsylvania, 2011.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM C876**: standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 2009. 6p.
- [18] CANIN PROCEQ. Operating instructions: corrosion analyzing instrument. 2007, 47p.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007. 4p.
- [20] _____, **ABNT NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005, 4p.

-
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 48**: Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use ferric chloride solution. Pennsylvania, 2009. 7p.
- [22] MACIAS, A; ANDRADE, A. The behavior of galvanized steel in chloride-containing alkaline solutions – I. The influence of the cation. **Corrosion Science**, v. 30, p.393-407, 1990.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projetos de estruturas de concreto: procedimentos. ABNT. Rio de Janeiro, 2003, 170p.
- [24] GONZÁLEZ, J.A.; RAMIREZ, E.; BAUTIST, A.; FELIU, S.; 1996.The behavior of pre-rusted steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.26, no.3, p. 501-511, 1996.
- [25] ANGST, U; VENNESLAND, O. Critical chloride content in reinforced concrete-State of the art. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, p. 311-317, 2009.
- [26] SAREMI, M. MAHALLATI, E. A study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution. **Cement and Concrete Research**, v.32, p. 1915–1921, dez. 2002.
- [27] MORENO,M.; MORRIS, W.; ALVAREZ, M.G.; DUFFÓ, G.S. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions effect of carbonation and chloride content. **Corrosion Science**, v. 46, p. 2681-2699, 2004.
- [28] LAMERT, P.; PAGE, C.L.; VASSIE, P.R.W. Investigations of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete. **Materials and Structures**, v.24, p. 351-358. 1991.
- [29] SÖYLEV, T.A.; FRANÇOIS, R. Corrosion of reinforcement in relation to presence of defects at the interface between steel and concrete. **Cement and Concrete Research**. V.33, fev., 2003. pp. 1407-1415.
- [30] ALHOZAIMY, A.; HUSSAIN, R.R.; AL-ZAID, R.; NEGHEMISH, A. Investigation of severe corrosion observed at intersection points of steel rebar mesh in reinforced concrete construction. **Construction and Building Materials**, v.37, p. 67-81, 2012.
- [31] Horne, A.T.; Richardson, I.G.; Brydson, R.M.D. Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v.37, p. 1613–1623, dec., 2007.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro. 2000. 3p.
- [33] KHEDR, S.A.; ABOU-ZEID, M.N.; ABADIR, J.M. Response of air-entrained concrete to severe chemical aggression. **Jornal of Materials in Civil Engineering**. p.11-17, jan., 2006.
- [34] NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1982. 739p.
- [35] American Concrete Institute. **ACI 212.3R-04**: chemical Admixtures for Concrete. ACI Committee 212, 2004, 30p.