

# Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos

*Behaviour of reinforced concretes with addition of ground clay bricks waste in relation to corrosion by chlorides*

**Gibson Rocha Meira**  
**Pablo Ramon Rodrigues Ferreira**  
**Valdith Lopes Jerônimo**  
**Arnaldo Manoel Pereira Carneiro**

## Resumo

**C**om o intuito de analisar o comportamento de concretos com substituição de cimento por resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM) frente à corrosão por cloretos, foram moldados corpos de prova (CPs) de concreto armado de 80 x 80 x 80 mm, com faixas de substituição do RTM de 0 %, 10 % e 30 % e fator água/aglomerante de 0,55. Após uma cura úmida de 7 dias e em ambiente de laboratório até 180 dias, os CPs foram submetidos a ciclos de imersão e secagem em solução de NaCl 1M. Uma vez identificada a despassivação das armaduras, perfis de cloretos livres e totais foram obtidos. Os resultados mostram que, embora haja uma pequena diminuição da resistência mecânica e do teor crítico de cloretos com a incorporação de RTM ao concreto, os concretos com RTM tendem a apresentar uma redução da sua capacidade de transporte de massa, que pode se sobrepor ao aspecto anterior e alongar o período de iniciação da corrosão.

**Palavras-chaves:** Concreto. Resíduo de tijolo. Durabilidade. Corrosão por cloretos.

## Abstract

*With the aim of analysing the behaviour of concrete with replacements of ground clay bricks waste (GCBW) under reinforcement corrosion by chlorides, reinforced concrete specimens with 80 x 80 x 80 mm were cast. The replacements were set at 0 %, 10 % and 30 % of cement weight and the water to cement ratio at 0.55. After a 7-day wet curing and in a laboratory environment until the 180th day, the specimens were subjected to wetting and drying cycles in a 1M sodium-chloride solution. After identification of depassivation of the reinforcement, total and free chloride profiles were obtained for each specimen. The results show that, although there is a slight decrease in compressive strength and in critical chloride content with GCBW addition to concrete, concretes with GCBW tend to show a reduction in mass transport ability, which can override the previous aspect and extend the initiation period of corrosion.*

**Keywords:** Concrete. Clay bricks waste. Durability. Chloride corrosion.

**Gibson Rocha Meira**  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia da Paraíba  
João Pessoa - PB - Brasil

**Pablo Ramon Rodrigues Ferreira**  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia da Paraíba  
João Pessoa - PB - Brasil

**Valdith Lopes Jerônimo**  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia da Paraíba João  
Pessoa - PB - Brasil

**Arnaldo Manuel Pereira  
Carneiro**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - PE - Brasil

Recebido em 08/04/14  
Aceito em 07/10/14

## Introdução

A confecção de concretos com o uso de resíduos da construção civil (RCC) vem sendo estudada desde o fim da Segunda Guerra Mundial, acerca de sua viabilidade técnico-econômica de cunho sustentável (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002; BEKTAS, 2014). Esses estudos envolvem a avaliação das propriedades mecânicas do concreto (LEVY, 2001; LEITE, 2001), a viabilidade econômica de seu emprego (OLIVEIRA; MATTOS; ASSIS, 2001; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004), o processo de hidratação e a formação de compostos do cimento com resíduos (TYDLITÁT *et al.*, 2012; VÁZQUEZ *et al.*, 2014), o transporte de massa na matriz cimentícia (TOLEDO FILHO *et al.*, 2007; ZONG; FEI; ZHANG, 2014) e alguns estudos de durabilidade (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; VAZQUEZ *et al.*, 2014; BEKTAS, 2014).

A composição dos resíduos da construção civil (RCC) pode apresentar significativa variabilidade. Contudo, os resíduos oriundos de materiais cerâmicos representam grande fatia da composição do RCC, com quantitativos que assumem 26% para Porto Alegre, 48% para Maceió, 21% para Campinas e 14% para Salvador. Essa fatia é de 32% para a Holanda e de 35% para Taiwan (LEITE, 2001; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004).

A inserção desses resíduos no concreto pode ser feita por substituição dos agregados ou substituição parcial do cimento. A maior parte dos estudos se concentra na substituição de agregados naturais por agregado reciclado de RCC (LEITE, 2001; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; TYDLITÁT *et al.*, 2012). Estudos focados na avaliação de concretos com substituição de cimento por resíduos cerâmicos ainda são poucos (VEJMEKOVÁ *et al.*, 2012; TOLEDO FILHO *et al.*, 2007).

Considerando a substituição de agregado graúdo por agregado reciclado de RCC, o trabalho de Levy (2001) mostra que a resistência mecânica do concreto não é afetada até a faixa de 20% de substituição, seguida por quedas drásticas até 100% de substituição. Nesse contexto, Vázquez *et al.* (2014) observaram um sutil aumento na resistência à compressão até a faixa de 20% de substituição, seguida de queda nessa propriedade. Por outro lado, Zong, Fei e Zhang (2014) relatam que a resistência mecânica diminui com a substituição de agregado graúdo natural por agregados reciclados de resíduos de tijolos. Levy (2001) e Zong, Fei e Zhang (2014) acrescentam que há queda da massa específica do material e aumento na absorção total.

Levando em consideração a substituição do cimento por resíduo de tijolo moído (RTM), Toledo Filho *et al.* (2007) e Vejmelková *et al.* (2012) observaram que a resistência mecânica do material tende a aumentar até uma faixa máxima de substituição entre 10% e 20%; em seguida, a resistência diminui consideravelmente.

Com relação à hidratação de pastas com substituição de cimento por RTM, Tydlitát *et al.* (2012) relatam que o calor de hidratação diminui significativamente com a substituição do cimento por esse tipo de resíduo reciclado, uma vez que o uso desse material retarda a hidratação do  $C_3S$ . Esses autores também concluem que as substituições estudadas têm efeito sobre a hidratação do cimento, até o limite de substituição de 20%, e o percentual excedente atua essencialmente na forma de filler.

Sobre a alcalinidade de concretos com a incorporação RTM, percebe-se que há redução gradativa no pH com a adição do resíduo. Vejmelková *et al.* (2012) observaram que os concretos de referência apresentam valores de pH da água de lixiviação da ordem de 12, após 60 dias de imersão em água destilada, enquanto concretos com substituição de 60% do cimento por RTM apresentaram pH da água de lixiviação da ordem de 11, demonstrando a redução de alcalinidade em função da incorporação do RTM.

Assim como os concretos convencionais, os concretos com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados também estão sujeitos a processos de degradação decorrentes da ação ambiental. A ação dos cloretos representa uma importante fonte de degradação das estruturas de concreto armado, devido à corrosão das armaduras. Ensaios que avaliam o transporte de cloretos na matriz cimentícia, quer seja com a aplicação de campo elétrico ou não, buscam obter parâmetros que quantifiquem esta maior ou menor habilidade de transporte e são amplamente utilizados como instrumentos de comparação entre distintas mesclas de concreto, ou na avaliação do período de iniciação da corrosão (TUUTTI, 1982).

A partir de perfis de concentração de cloretos, a segunda Lei de Fick tem sido adotada para avaliar o transporte por difusão de cloretos no concreto, empregando-se, para tal, a Equação 1, onde  $C(x,t)$  é a concentração dos cloretos na profundidade  $x$  no tempo  $t$ ;  $C_0$  é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto;  $C_s$  é a concentração de cloretos na superfície do concreto;  $erf$  é a função de erro de Gauss; e  $D$  é o coeficiente de difusão. Embora a Equação 1 tenha as limitações de

assumir  $C_s$  e  $D$  constantes, fato este que não corresponde à realidade (ANDRADE; CASTELLOTE; D'ANDREA, 2011), esta ainda é amplamente utilizada, dada sua facilidade de aplicação.

$$C(x, t) = C_s + (C_0 - C_s) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

Considerando o comportamento do coeficiente de difusão em matrizes com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados, Zong, Fei e Zhang (2014), estudando concretos com a incorporação de agregados de resíduos cerâmicos, obtiveram aumento de pouca expressão nesse parâmetro, até a faixa de 30% de substituição, seguido por aumentos significativos até o nível de substituição de 50%. Por outro lado, Vejmelkova *et al.* (2012), estudando concretos com a adição de RTM em substituição ao cimento, apesar de não terem avaliado diretamente o transporte de cloretos, obtiveram bom desempenho de concretos com níveis de substituição até 20%, quer seja em relação à resistência mecânica, quer seja em relação a ensaios relacionados à durabilidade, como absorção de água.

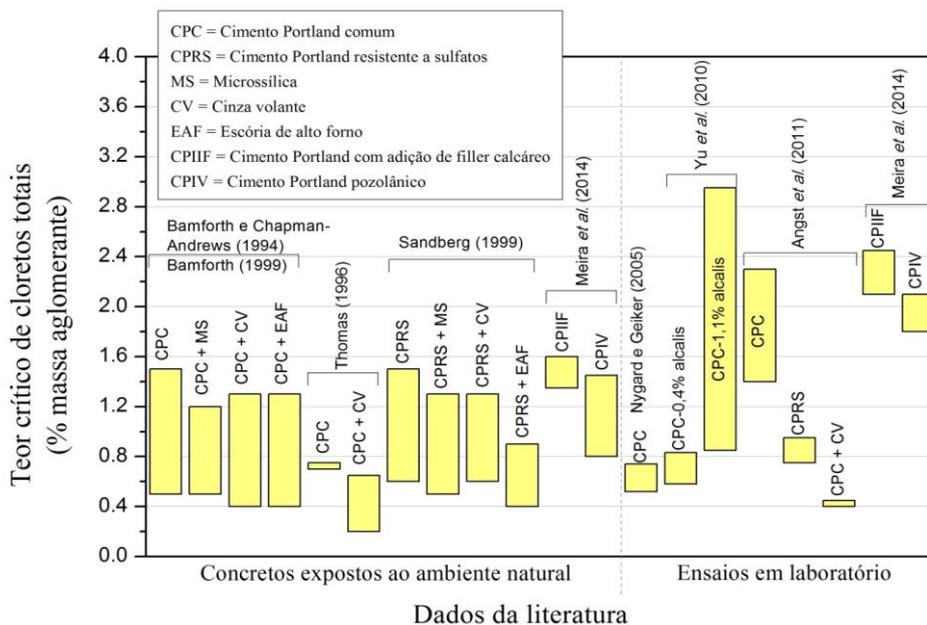
Tomando como referência que o período de iniciação da corrosão se finaliza com a despassivação da armadura (TUUTTI, 1982), a quantidade de cloretos necessária para desencadear esse processo (teor crítico de cloretos) depende das características da matriz cimentícia, em especial do pH da solução dos poros do concreto (HAUSMANN, 1967). Nesse sentido, o uso de adições minerais costuma contribuir para a redução do teor crítico, em função do consumo de

hidróxidos nas reações pozolânicas (MEIRA *et al.*, 2014). A Figura 1 apresenta resultados relativos ao teor crítico de cloretos para concretos com a incorporação de adições minerais tradicionais, como, por exemplo, sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, o que corrobora o anteriormente comentado. No entanto, ainda há carência de estudos sobre o tema para matrizes que empregam materiais reciclados de resíduos cerâmicos.

Como se pode observar, ainda há forte carência de estudos focados na durabilidade de concretos com a incorporação de materiais reciclados de resíduos cerâmicos, em especial no que se refere à corrosão de armaduras. Esse aspecto, aliado ao significativo volume de RTM gerado pelas indústrias de cerâmica vermelha (VIEIRA, 2005), denota a importância da realização de estudos sobre durabilidade que considerem o emprego do RTM em matrizes cimentícias.

Partindo desse pressuposto e considerando a corrosão de armaduras desencadeada por cloretos, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento de concretos armados com substituição do cimento por RTM com relação à penetração de cloretos, ao comportamento eletroquímico das armaduras e ao teor crítico de cloretos. A escolha do RTM, como substituto do cimento, se baseou não só no aspecto ambiental de redução do consumo de clínquer mas também na perspectiva de atividade pozolânica do material, conforme discutido na seção Materiais empregados.

Figura 1 - Comportamento do teor crítico de cloretos para concretos sem e com adições minerais



## Materiais e programa experimental

### Materiais empregados

Para a confecção dos corpos de prova de concreto, foram empregados os seguintes materiais: água, areia, brita, RTM e cimento Portland. A água utilizada neste trabalho foi potável, fornecida pela concessionária local, com teor médio de cloretos de 1,3 mg/l. O agregado miúdo foi uma areia quartzosa média de cava, com dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura de 3,06. O agregado graúdo foi brita granítica, com dimensão máxima característica de 9,5 mm e módulo de finura de 6,87. A Figura 2 mostra a distribuição granulométrica dos agregados empregados, com suas porcentagens acumuladas e individuais.

O RTM empregado foi originário da indústria de cerâmica vermelha (tijolos cerâmicos) e foi moído em moinho de bolas até uma finura aproximada de 5.000 cm<sup>2</sup>/g, medida através de permeabilímetro Blaine (ABNT, 1998). Os resultados das caracterizações física e química do RTM estão dispostos na Figura 3 e na Tabela 1. A caracterização química do RTM foi feita através de fluorescência de raios X, empregando-se um espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Rigaku, modelo RIX 3000. A soma dos óxidos de ferro, alumínio e sílica são maiores que 70%, como determina a NBR 12653 (ABNT, 2012b), para materiais pozolânicos. Segundo a NBR 5752 (ABNT, 2012a), o RTM empregado apresenta atividade pozolânica, com índice de atividade pozolânica de 86%. Em função desse aspecto, esse material foi empregado como substituição ao cimento.

Figura 2 - Distribuição granulométrica dos agregados

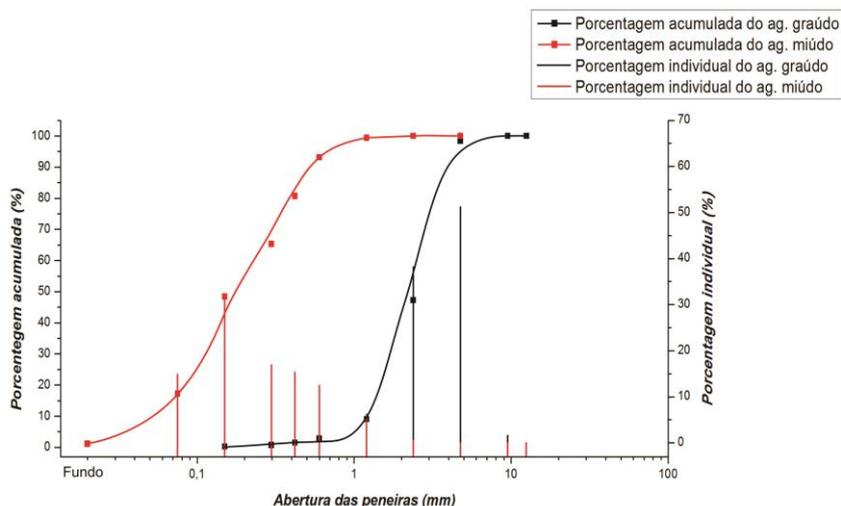
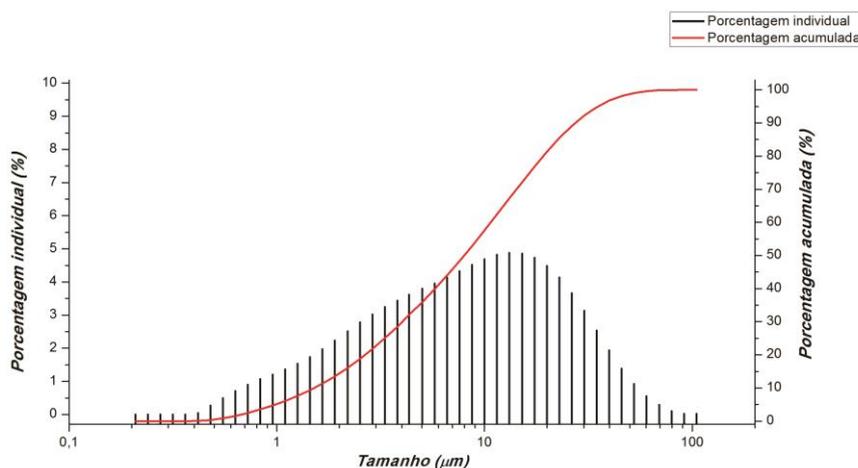


Figura 3 - Granulometria a laser do RTM



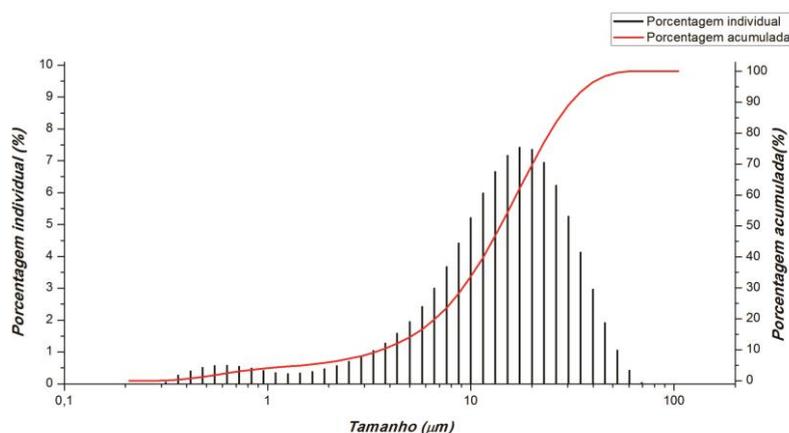
Com relação ao cimento, optou-se por um cimento Portland CPV – ARI, devido a seus baixos níveis de adição na fabricação. As características físicas e químicas desse cimento estão na Tabela 1, e sua

granulometria a laser, na Figura 4. Empregaram-se, para tal, os mesmos ensaios adotados para o RTM.

Tabela 1 - Composição química e propriedades físicas do cimento e do RTM

Características analisadas	Cimento	Limite (ABNT, 1991)	RTM	Limite (ABNT, 2012b)	
Composição química (%) – Fluorescência de raios X	Na <sub>2</sub> O	-	0,4	≤1,5	
	MgO	0,4	1,1	-	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	16,2	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥ 70%	
	SiO <sub>2</sub>	10,9	51,9		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0	16,4		
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,2	-	
	SO <sub>3</sub>	4,1	≤3,5	1,2	-
	K <sub>2</sub> O	0,6	-	4,8	-
	CaO	73,3	-	3,5	-
	SrO	0,1	-	0,1	-
	ZrO <sub>2</sub>	-	-	0,1	-
	TiO <sub>2</sub>	0,4	-	2,0	-
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	-	0	-
	BaO	-	-	0,2	-
	MnO	0,1	-	0,3	-
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,1	-
Perda ao fogo (%) - NBR 5743 (ABNT, 1989)	2,4	≤4,5	1,5	-	
Área específica – Blaine (cm <sup>2</sup> /g) - NBR NM 76 (ABNT, 1998)	3820	≥3000	5080	-	
Tempo de pega (min) – NBR NM 65 (ABNT, 2003b)	Início	139	≥60	-	
	Fim	236	≤600	-	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) – NBR NM 23 (ABNT, 2001)	3,15	-	2,62	-	

Figura 4 - Granulometria a laser do cimento



## Dosagens e confecção dos corpos de prova

Concretos com relação água/aglomerante 0,55 e com 0%, 10% e 30% de RTM em substituição, em massa, ao cimento foram empregados. A relação água/aglomerante de 0,55 foi adotada em função de ser habitual em obras da região e representar uma situação mediana da rede porosa do concreto. A Tabela 2 apresenta as dosagens empregadas neste trabalho, bem como os resultados de resistência à compressão e absorção de água, realizados aos 28 e 180 dias.

Para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água, empregaram-se corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm, desmoldados com 24 h e curados por 7 dias em imersão total de água saturada com cal. Após o tempo de cura, foram dispostos em ambiente de laboratório até a realização do ensaio. A cura de 7 dias foi adotada em função de sua maior proximidade com as condições praticadas em obra.

Para os ensaios de indução da corrosão por cloretos, os corpos de prova (CPs) tiveram dimensões de 80x80x80 mm. Em cada CP, duas barras de aço CA-50 de 6,3 mm de diâmetro foram dispostas, conforme mostra a Figura 5. As barras foram cortadas com 100 mm de comprimento e foram previamente limpas mediante escovação mecânica. Esse procedimento teve por objetivo não haver muita distância da condição de aplicação em obra. Logo após, as extremidades das barras

foram envoltas por fita adesiva de PVC, de modo a propiciar uma longitude exposta de 30 mm. As barras foram posicionadas com cobertura de 20 mm; em seguida, ocorreu a moldagem dos CPs. A desmoldagem aconteceu após 24 h da moldagem e a cura foi realizada por 7 dias em câmara úmida (UR de 95±2% e T 25±5 °C). Após essa cura, os CPs foram dispostos em ambiente de laboratório até atingir uma microestrutura mais estável (180 dias) e, em seguida, foram pintados com resina epóxi em quatro das seis faces, com o intuito de simular um fluxo unidirecional dos cloretos. Foram utilizados três CPs (seis barras) para cada condição de ensaio analisada.

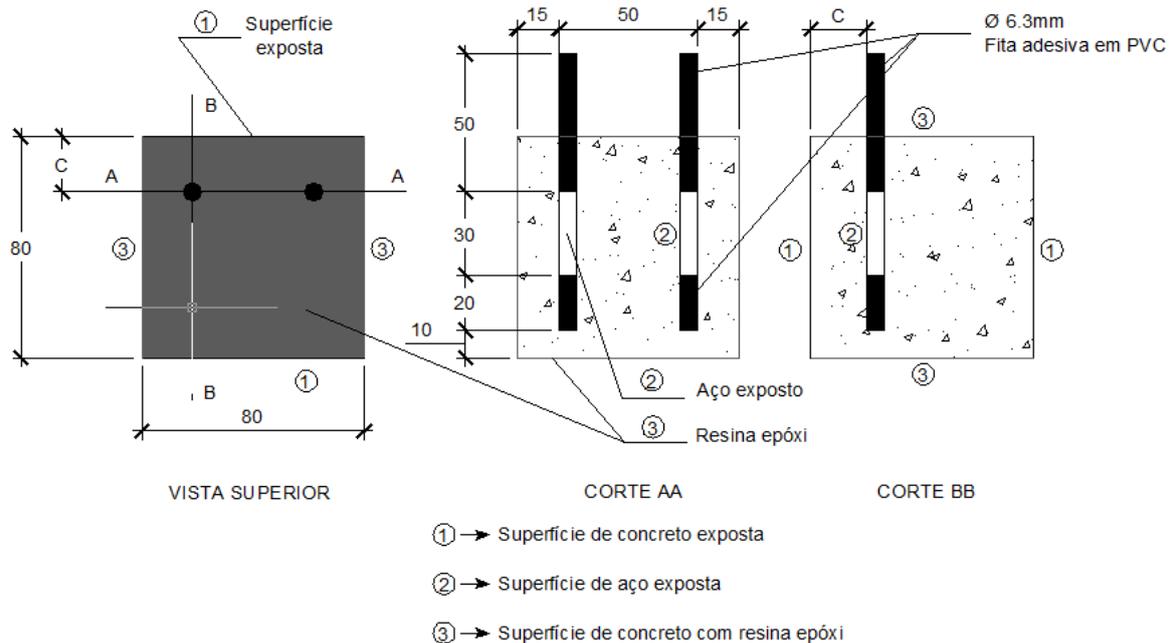
## Ensaio acelerado de indução da corrosão por cloretos

O ensaio de indução da corrosão por cloretos foi feita por meio de ciclos de imersão e secagem. Esse tipo de ensaio caracteriza-se por submeter os corpos de prova a períodos de imersão (total ou parcial) em solução agressiva e posterior secagem (em ambientes de laboratório ou estufas). Neste trabalho, empregou-se imersão total de 3 dias em solução de cloreto de sódio 1M e secagem em estufa a 40 °C por 4 dias. A renovação da solução foi feita a cada 2 ciclos, com o objetivo de minimizar o efeito de alteração de sua concentração em função do transporte de cloretos para o interior do concreto e eventual evaporação de água.

Tabela 2- Dosagens e características físicas e mecânicas dos concretos

Características analisadas	Traços (cimento: RTM: areia: brita: a/c)			
	1:0:1,86:2,25:0,55	0,9:0,1:1,86:2,25:0,55	0,7:0,3:1,86:2,25:0,55	
	C4 REF	C4 10%	C4 30%	
Abatimento (mm) – NBR NM 67 (ABNT, 1996)	220	215	195	
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	414,3	372,9	290	
Absorção de água NBR 9778 (ABNT, 2005)	28 dias			
	Ind. de vazios (%)	14,6	14,6	14,1
	Absorção (%)	6,8	6,8	6,4
	180 dias			
Ind. de vazios (%)	14,1	14,9	13,7	
Absorção (%)	6,6	6,8	6,3	
pH da água de equilíbrio - BT/PCC/259 (OLIVEIRA; AGOPYAN, 2000)	12,4	-	12,0	
Resistência à compressão (MPa) – NBR 5738 (2003a)	28 dias	33,8	27,5	21,4
	180 dias	44,9	41,5	37,1

Figura 5 - Características geométricas dos corpos de prova (medidas em mm)



A escolha da solução empregada se deu pelo fato de a solução de cloreto de sódio 1M ser a mais empregada na literatura (GLASS; HASSANEIN, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006). Quanto aos ciclos, os períodos de imersão/secagem mais empregados são de 3 dias para imersão e de 4 dias para secagem ou de 2 dias para imersão e de 5 dias para secagem (GJΦRV; VENNESLAND, 1979; CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST *et al.*, 2011), optando-se pela primeira forma. No que se refere à forma de secagem, há, na literatura, certo equilíbrio entre a secagem em ambiente de laboratório (WHEAT, 2002; TAVARES; COSTA; ANDRADE, 2006; ANGST *et al.*, 2011) e a secagem em estufa, com temperatura variando entre 40 e 50 °C (VIEIRA, 2003; TAVARES; COSTA; ANDRADE, 2006; KISHIMOTO, 2010). No presente caso, optou-se pela secagem em estufa, em função da redução do tempo de ensaio.

No método empregado (ciclos de imersão e secagem), a sucção capilar, que se caracteriza pela penetração dos íons cloretos na rede porosa do material por tensões capilares (ANGST; VENNESLAND, 2008), prevalece nas camadas superficiais do concreto. No entanto, nas camadas mais profundas, onde a perda de água não é tão acentuada durante a secagem, também ocorre difusão (MEIRA *et al.*, 2010). Entre os métodos empregados no cenário nacional, esse é o mais difundido, o que também motivou sua escolha no presente estudo. A Figura 6 apresenta imagens desse ensaio, com as etapas de imersão em solução (Figura 6a) e secagem em estufa (Figura 6b).

## Monitoramento eletroquímico e análise química

O monitoramento das barras nos CPs foi realizado através da técnica eletroquímica de resistência de polarização com compensação da queda ôhmica e de medidas do potencial de corrosão em circuito aberto. O equipamento empregado nas leituras foi um ponteciostato de bancada, modelo GILL AC da ACM Instruments (Figura 7a). Para a realização das medidas, empregou-se um eletrodo de referência de Cu|CuSO<sub>4</sub> (ESC) e um contraeletrodo de aço inoxidável, mantendo-se todo o conjunto em uma gaiola de Faraday, para evitar interferências externas (Figura 7b). As leituras foram feitas sempre após as imersões na solução agressiva, o que se processou até a detecção da despassivação da barra. A técnica de resistência de polarização (Rp) tem sido amplamente empregada na literatura com o objetivo de detecção da despassivação das armaduras e estudos sobre o teor crítico de cloretos (ANGST; VENNESLAND, 2008; MEIRA *et al.*, 2014) e alia uma resposta eficiente em relação à identificação da instalação do processo de corrosão com a rapidez das medidas. Nesse sentido, esses foram os motivos de sua adoção no presente estudo.

Leituras de potencial de corrosão mais eletronegativas que -350 mV (ESC) e densidade de corrente superiores a 0,1 µA/cm<sup>2</sup>, acompanhadas de um salto nessas medidas, foram utilizadas como critérios para identificar o momento da despassivação, conforme recomenda a literatura

(CASCUDO, 1997; AMERICAN..., 2009; ANGST; VENNESLAND, 2008). Quando identificados tais requisitos simultaneamente e realizadas duas leituras consecutivas, de modo a comprovar a despassivação, os CPs eram retirados de ensaio.

Comprovada a despassivação de alguma armadura, a barra despassivada era removida do CP e eram extraídas as amostras para obtenção dos teores de cloretos. Para isso, seguiram-se as seguintes etapas: primeiro procedia-se à separação do CP em duas partes, com um disco de corte diamantado, o que resultava em dois CPs com uma barra em cada um; aquele cuja barra encontrava-se despassivada era suavemente rompido, no sentido do alinhamento da barra, utilizando-se martelo e talhadeira. Uma vez identificada a presença do(s) pite(s), havia a marcação de sua distância até a superfície do CP e das amostras a serem extraídas, para, então, a barra ser removida do CP. Essas amostras eram compostas de uma amostra

superficial, representada pelo primeiro milímetro mais superficial, e mais quatro amostras de 5 mm, obtidas em camadas sucessivas, as quais eram extraídas empregando-se a mesma ferramenta de corte, removendo-se 3 mm das faces pintadas para descarte da camada de epóxi.

Após a extração das amostras, elas eram pulverizadas manualmente, com o emprego de um almofariz e pistilo, peneiradas em uma peneira número 100 e imediatamente imersas em acetona, de modo a evitar sua carbonatação. Essas amostras foram empregadas em análises químicas para determinação dos teores de cloretos livres e totais. A preparação dessas amostras para titulação seguiu as recomendações do RILEM (2002a, 2002b), e a determinação dos teores de cloretos livres e totais foi realizada a partir da técnica de titulação potenciométrica, seguindo as recomendações da ASTM C114 (AMERICAN..., 1992). Para tal, empregou-se um titulador automático, modelo Titrino, da Metrohm.

Figura 6- Ensaio de (a) imersão e (b) e secagem

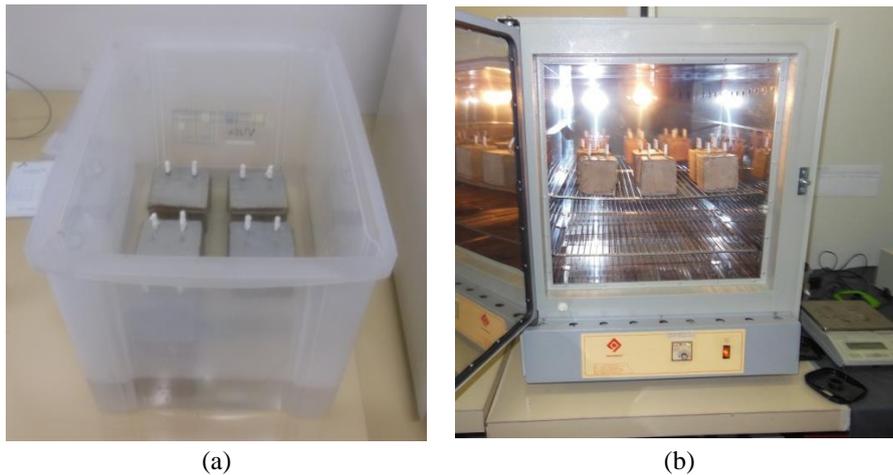


Figura 7 - Arranjo para as medidas de resistência de polarização - (a) vista geral e (b) detalhe dos eletrodos e corpo de prova



## Resultados

### Monitoramento eletroquímico

Os resultados do monitoramento eletroquímico (potencial de corrosão e densidade de corrente instantânea de corrosão) estão apresentados nas Figuras 8, 9 e 10. As faixas indicadoras do risco de corrosão para as medidas de potencial (AMERICAN..., 2009) e do nível de corrosão para as medidas de corrente (CIGNA *et al.*, 1997) foram incorporadas às referidas figuras. Os resultados mostram queda brusca do potencial de corrosão das barras e aumento, também brusco, na densidade de corrente de corrosão, com o avanço dos ensaios acelerados de indução da corrosão.

Para todos os traços em questão, percebe-se essa tendência. Esse comportamento é típico para os casos de despassivação por cloretos, conforme se observa em outros trabalhos (CASTRO; VÉLEVA; BALACÁN, 1997; GARCÍA-ALONSO *et al.*, 2010; ANGST *et al.*, 2011).

Para um mesmo traço, observa-se claramente variação no tempo de despassivação de cada barra, porém há uma tendência geral de despassivação na sequência C4 10%, C4 REF e C4 30%, com uma boa aproximação entre os dois primeiros. O tempo médio de despassivação e seu desvio padrão foi de  $42 \pm 18$  dias para C 10%,  $50 \pm 6$  dias para C REF, e  $82 \pm 34$  dias para C 30%.

Figura 8 - Potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão - Traço C REF

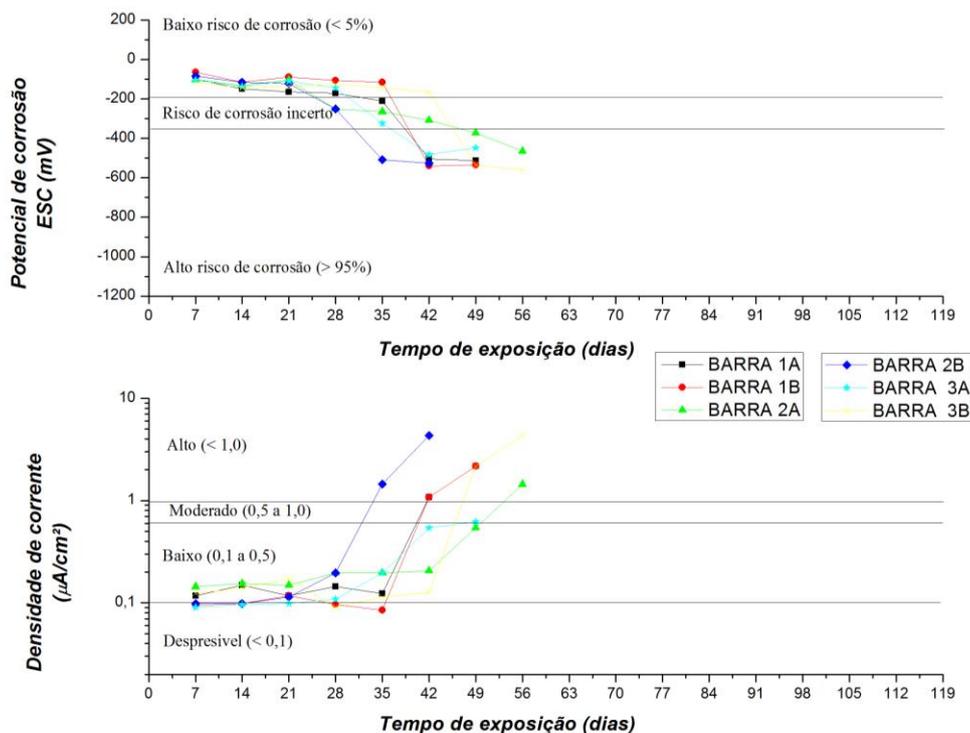


Figura 9- Potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão - Traço C 10%

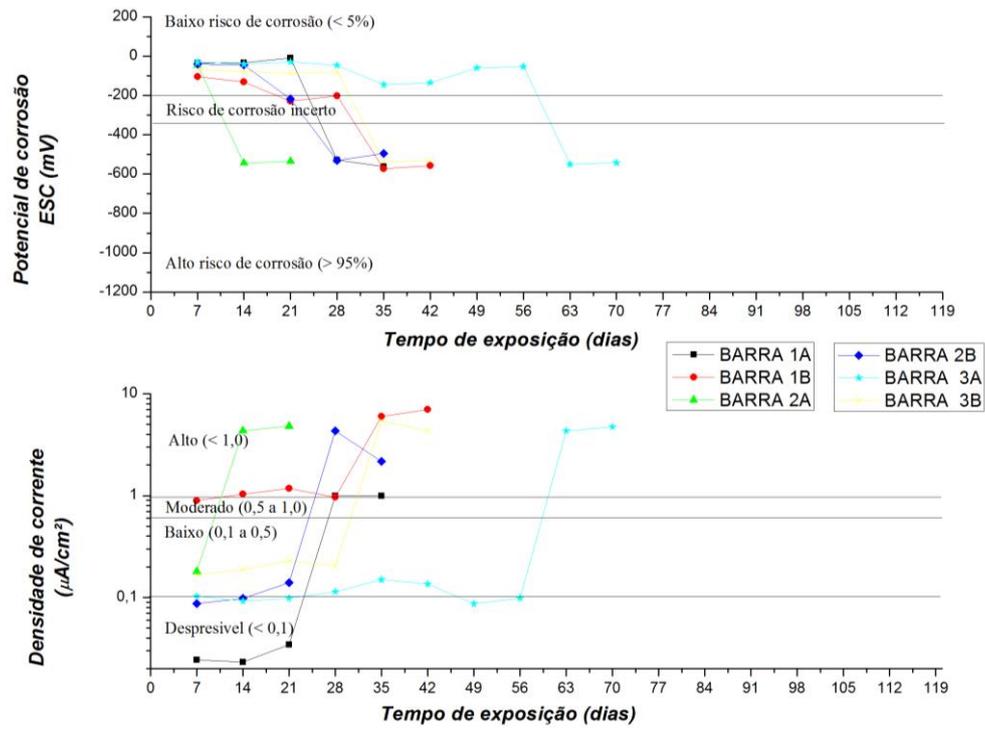
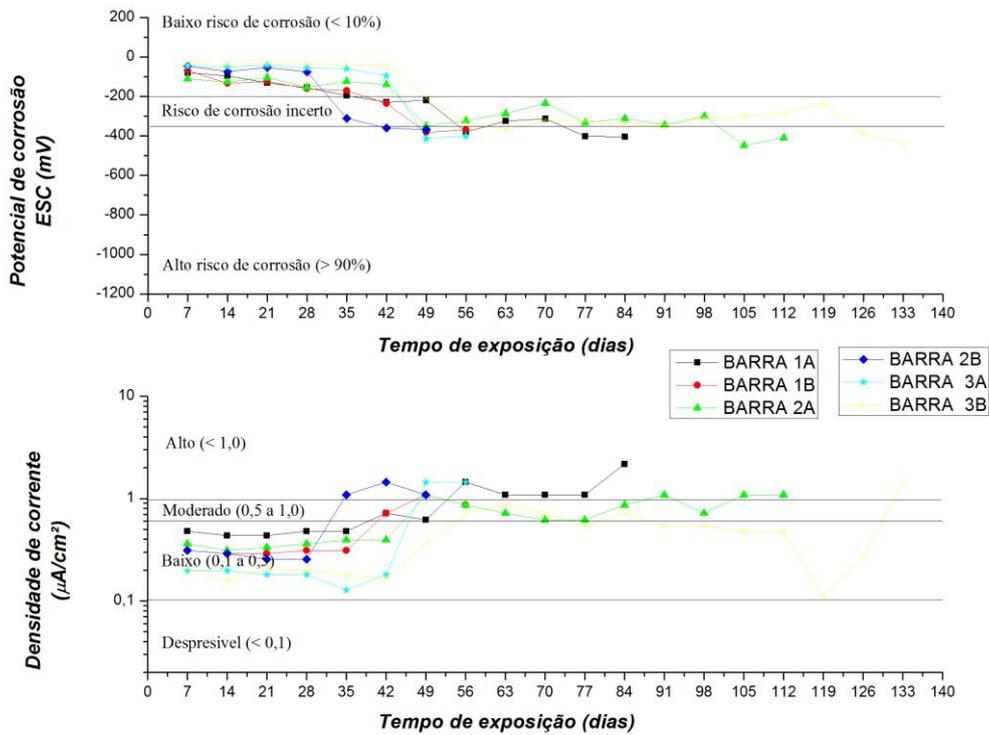


Figura 10 - Potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão - Traço C 30%



## Perfis de cloretos

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os resultados obtidos para os perfis de cloretos (totais e livres), a partir das titulações potenciométricas.

Conforme esperado, percebe-se redução nos teores de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade. No entanto, há formação de um pico de concentração interna nas primeiras camadas desses perfis, caracterizando o que se chama de perfil em duas zonas. Esse tipo de perfil caracteriza-se por apresentar uma concentração máxima de cloretos distante alguns milímetros da superfície do concreto, que delimita uma zona onde a absorção capilar é o principal mecanismo de transporte e uma zona mais interna, onde prevalece o mecanismo de transporte por difusão (CASTRO; DE RINCÓN; PAZINI, 2001).

Esse comportamento é explicado pela característica do método de indução da corrosão adotado, que se baseia em ciclos de umectação e secagem, o que favorece uma troca de umidade mais intensa nas camadas mais superficiais (CASTRO; DE RINCÓN; PAZINI, 2001; MEIRA *et al.*, 2007). A formação de perfis de cloretos em duas zonas é relativamente comum e foi observada por diversos autores (CASTRO; DE RINCÓN; PAZINI, 2001; LEVY, 2001; MEIRA *et al.*, 2007; COSTA; APPLETON, 2007; ANGST *et al.*, 2011), sempre com a formação de picos nas camadas mais superficiais.

Ao se compararem os perfis de cloretos totais e livres, observa-se, além de um incremento nas concentrações para cloretos totais, uma intensificação desses picos, o que se explica pela fixação de cloretos na matriz cimentícia.

Figura 11- Perfis de cloretos totais e livres para C REF

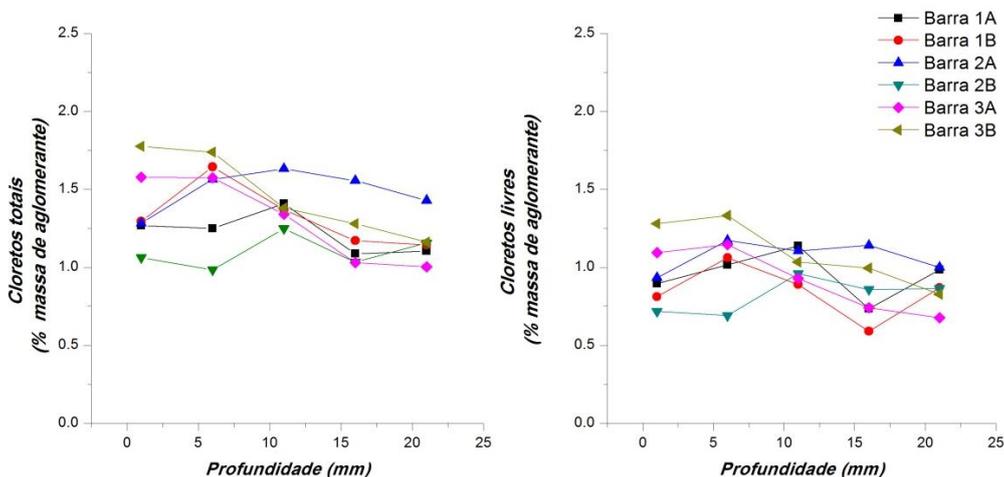


Figura 12 - Perfis de cloretos totais e livres para C 10%

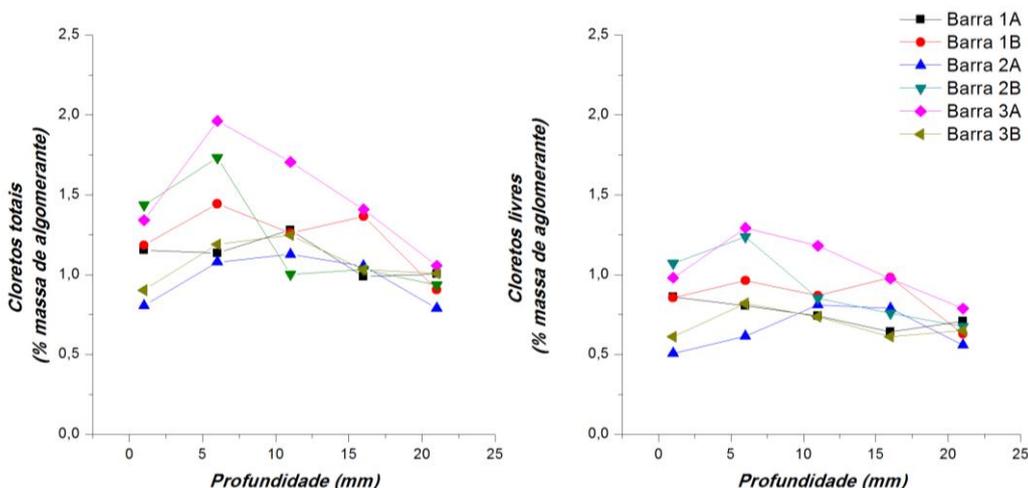
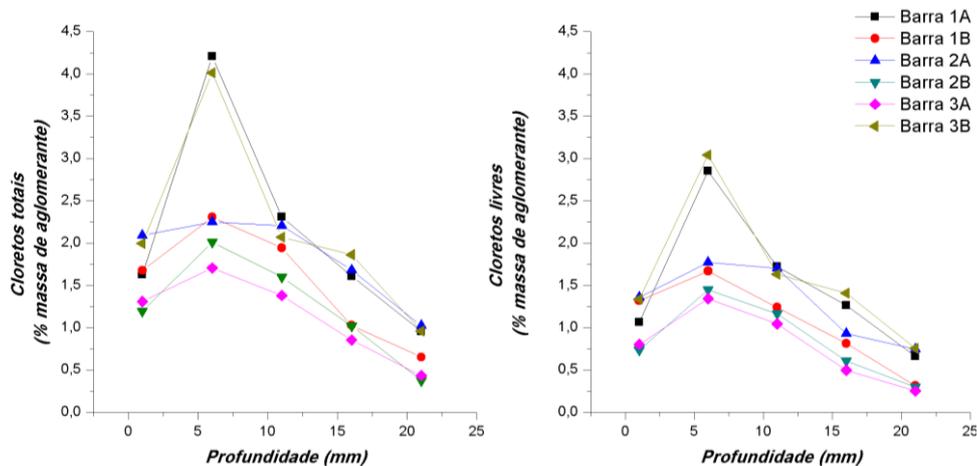


Figura 13 - Perfis de cloretos totais e livres para C 30%



Com relação à incorporação de resíduos em substituição ao cimento, percebe-se que, com o aumento no teor de RTM, há um pequeno aumento nas concentrações de cloretos livres e totais nas camadas mais superficiais, especialmente para a taxa de substituição de 30%, explicado pelo maior período de exposição à solução agressiva.

## Análise e discussão dos resultados

### Parâmetros eletroquímicos

Através das Figuras 8, 9 e 10, pode-se observar que, para as primeiras idades, os corpos de prova de referência apresentaram a tendência de leituras de potencial menos eletronegativas e correntes mais baixas, seguindo-se das dosagens C 10% e C 30 %. Isso se explica pelo maior consumo de cimento da dosagem de referência, que proporciona maior alcalinidade na solução dos poros do concreto (Tabela 2) e, portanto, melhor estabilidade da película de passivação (PAGE, 1975; ANGST; VENNESLAND, 2008). Contudo, isso não se traduz em maior tempo para despassivação, uma vez que as dosagens com maior teor de RTM contribuem para a fixação de uma maior quantidade de cloretos na matriz e apresentam menor velocidade de transporte de cloretos, conforme se discute na seção seguinte.

Com o objetivo de analisar a relação entre o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e a densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ), elaborou-se a Figura 14, que mostra o comportamento relativo desses dois parâmetros. Apesar de haver certa dispersão, dado o caráter estocástico do processo de corrosão, pode-se observar uma relação linear inversa entre o potencial e o logaritmo da corrente, conforme já observado por outros autores (ANDRADE, 1988; VIEIRA, 2003; ANGST *et al.*, 2011).

Considerando as dosagens e a relação linear entre  $E_{corr}$  e o logaritmo de  $i_{corr}$ , foram realizadas regressões lineares para as diferentes dosagens (Figura 14). Os resultados indicam a tendência de deslocamento para cima das retas representativas das dosagens com adição de RTM, o que significa que, para um mesmo potencial de corrosão, as densidades de corrente de corrosão são superiores para as dosagens com adição de RTM. Esse comportamento corrobora o anteriormente comentado em relação a uma melhor formação da película de passivação para a dosagem de referência.

### Transporte de cloretos

Considerando os perfis de cloretos em duas zonas, conforme comentado na seção Perfis de cloretos, é possível analisar o comportamento desses a partir da zona mais interna, onde prevalece o transporte por difusão, considerando um perfil reescalonado, conforme mostra a Figura 15 (ANDRADE; ALONSO, 1997; MEIRA *et al.*, 2010). Com base no perfil reescalonado, a concentração máxima observada nas camadas internas mais superficiais passa a ser a nova concentração superficial do perfil reescalonado, mantendo-se os demais pontos internos do perfil, com o novo referencial de profundidade a partir do ponto de concentração máxima. Esse foi o procedimento adotado no presente estudo para avaliar o comportamento do coeficiente de difusão e demais parâmetros relacionados ao transporte de cloretos, nas dosagens estudadas.

A obtenção do coeficiente de difusão ( $D$ ) e da concentração superficial ( $C_s$ ) de cloretos no concreto se deu a partir de ajustes aos perfis experimentais de cloretos livres com base na segunda Lei de Fick (Equação 1), cujos resultados são apresentados na Tabela 3. Embora, na

literatura, seja comum esse tipo de ajuste também para cloretos totais, optou-se por apresentar aqueles relativos aos perfis de cloretos livres, em função de serem esses cloretos os que efetivamente são transportados. Cabe ressaltar que esses ajustes são uma simplificação da realidade, em que a concentração superficial e o coeficiente de difusão variam em função do tempo, e a relação entre cloretos livres e combinados varia em função das condições de equilíbrio químico, em cada profundidade. Nessas regressões, consideraram-se os perfis de cloretos no momento da despassivação. Dessa forma, estes representam parâmetros obtidos com menores diferenças em relação aos efeitos da idade sobre a aposidade, quando observado o longo período de cura/repouso (180 dias). Portanto, esse aspecto

deve ser ponderado nas considerações aqui realizadas.

Percebe-se que a concentração superficial ( $C_s$ ) não obteve variação significativa entre os corpos de prova de referência e com 10% de RTM, porém, para a dosagem C 30%, há aumento considerável na concentração em questão, o que se explica pelo maior tempo de exposição e por sua maior capacidade de fixação de cloretos na matriz, conforme se pode verificar na Tabela 4, que apresenta a relação entre cloretos combinados e totais, sobre os quais se discute a seguir. Dispersões significativas (entre 20% e 35%) nos valores do parâmetro aqui analisado são usuais na literatura e representam, além da heterogeneidade dos materiais, limitações dos procedimentos de ensaio e ajustes adotados (ANGST *et al.*, 2011).

Figura 14 - Relação entre  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  para os casos estudados

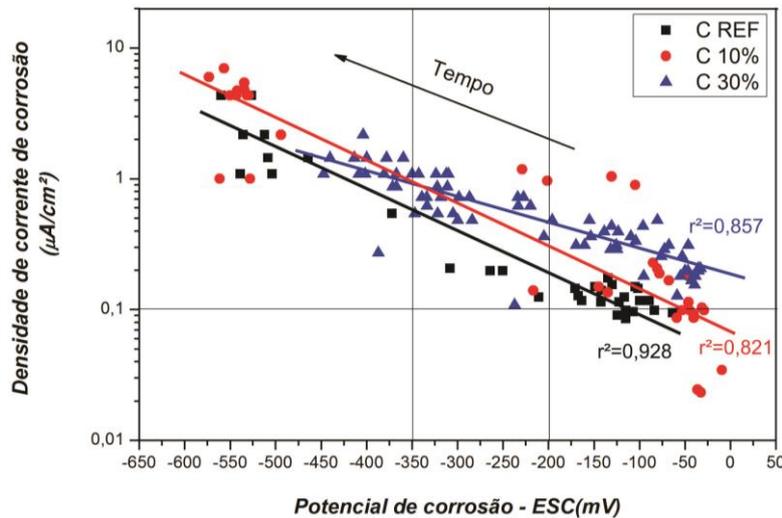


Figura 15 - Representação esquemática do reescalonamento dos perfis

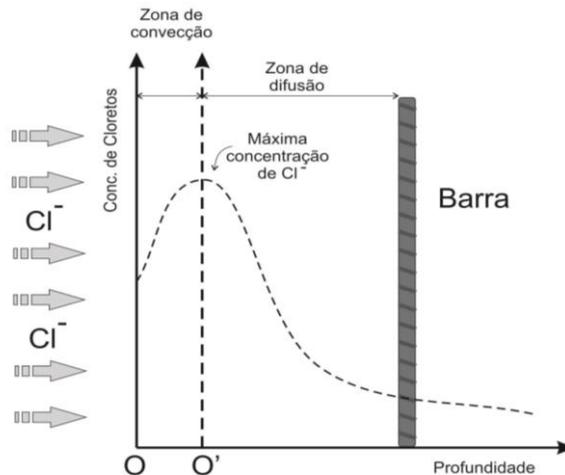


Tabela 3 - Parâmetros relacionados aos ajustes da segunda Lei de Fick aos perfis experimentais de cloretos livres

Dosagem	Período de exposição (dias)	$C_s$ (% massa aglom.)	$D(\text{cm}^2/\text{s})$	$r^2$	
C 30%	Barra 1A	84	2,88	6,12E-08	0,95
	Barra 1B	56	1,72	7,24E-08	0,87
	Barra 2A	112	1,89	9,95E-08	0,83
	Barra 2B	49	1,51	7,31E-08	0,96
	Barra 3A	56	1,40	6,87E-08	0,91
	Barra 3B	133	2,98	2,48E-08	0,86
	<b>Média/desvio</b>	<b>82 ± 34</b>	<b>2,06 ± 0,69</b>	<b>6,68 ± 2,42 E-08</b>	-
C 10%	Barra 1A	35	-	-	-
	Barra 1B	42	0,98	7,28E-07	0,81
	Barra 2A	21	0,84	1,31E-06	0,60
	Barra 2B	35	1,23	4,09E-08	0,96
	Barra 3A	70	1,32	1,80E-07	0,95
	Barra 3B	42	0,83	5,43E-07	0,71
	<b>Média/desvio</b>	<b>42 ± 18</b>	<b>1,04 ± 0,22</b>	<b>5,60 ± 5,012 E-07</b>	-
C REF	Barra 1A	49	-	-	-
	Barra 1B	49	1,06	7,98E-08	0,97
	Barra 2A	56	1,17	8,87E-06	0,53
	Barra 2B	42	0,96	4,50E-06	0,78
	Barra 3A	49	1,15	8,24E-07	0,99
	Barra 3B	56	1,29	2,75E-07	0,90
	<b>Média/desvio</b>	<b>50 ± 6</b>	<b>1,13 ± 0,12</b>	<b>2,91 ± 3,79 E-06</b>	-

Os coeficientes de difusão foram obtidos a partir de regressões empregando-se a segunda Lei de Fick no ato da despassivação, tendo como consequência valores de  $D$  em distintas idades. No entanto, o longo período de cura/repouso dos CPs contribuiu para estabilizar a matriz cimentícia e, certamente, minimizou a influência da diferença de idade no coeficiente de difusão, possibilitando compará-los de forma geral. A Figura 16 mostra o coeficiente de difusão e o índice de vazios, considerando os diversos teores de substituição do cimento. Observa-se, nessa figura, que, assim como há uma leve tendência de redução do índice de vazios com o incremento da quantidade de RTM, também há redução no coeficiente de difusão no mesmo sentido. Esse comportamento do coeficiente de difusão pode ser explicado através de dois aspectos: primeiro, e com menor influência, embora a ação pozolânica não tenha sido capaz de reverter o comportamento da resistência dentro do período analisado (180 dias), devido à baixa reatividade do RTM, é possível que as alterações provocadas pelas reações pozolânicas (refinamento de poros e aumento de tortuosidade) tenham começado a impactar nas medidas de absorção e no transporte de cloretos; segundo, e com maior impacto no transporte de cloretos, a maior capacidade de fixação de cloretos dos concretos com adição de RTM, conforme se pode observar na Tabela 4.

A Tabela 4 expõe a relação entre cloretos combinados e totais para as diversas profundidades de amostra analisadas. Portanto, os valores apresentados representam médias e desvios de seis amostras para cada condição analisada. É possível verificar uma leve tendência de maior fixação de cloretos para as matrizes com incorporação de RTM, que pode ser explicada não só pela combinação com os aluminatos aportados pelo resíduo como também por uma fixação em outras estruturas hidratadas, como o CSH, por exemplo (ENEVOLDSEN; HANSSON; HOPE, 1994).

### Teor crítico de cloretos

Os valores de teores críticos foram obtidos a partir dos ajustes da segunda Lei de Fick aos perfis experimentais obtidos após a constatação da despassivação, considerando-se os perfis reescalados e a menor distância entre a superfície do concreto e o pite de corrosão na barra. Assim, com essa profundidade, obtinha-se a concentração de cloretos no perfil ajustado, a qual foi assumida como concentração crítica. Esse procedimento foi empregado tanto para os teores de cloretos totais como para os livres. Após a obtenção dos valores de teores críticos, adicionalmente, foi empregada a técnica estatística de Chauvenet, para análise dos dados espúrios, o que permitiu o emprego de dados mais consistentes e representativos da amostra. A Figura

17 mostra os resultados médios e desvios dos teores críticos para cloretos totais e livres após a utilização da referida técnica.

A partir da Figura 17, percebe-se uma queda nas concentrações críticas de cloretos livres e totais para início do processo de corrosão com o incremento da quantidade de RTM. Considerando que a formação da película passivadora e sua estabilidade eletroquímica é fortemente influenciada pelo pH da solução dos poros do concreto (TREADAWAY, 1988; ANGST; VENNESLAND, 2008), observa-se que a redução de pH provocada pela incorporação do RTM (Tabela 2) contribui para diminuir o teor crítico de cloretos. Esse comportamento converge com resultados de outros autores, que trabalharam com outros tipos de adição mineral, conforme pode ser

visto na Figura 1. A faixa de valores obtida para cloretos totais também condiz com aquelas observadas na literatura, indicando que, embora haja redução no teor crítico de cloretos com o emprego do RTM, essa redução se mantém em patamares compatíveis com o emprego de outras adições mais tradicionais.

Considerando o caso específico do teor crítico de cloretos totais, o incremento da adição de RTM contribui para o aumento do teor de cloretos combinados (6% para os concretos C 10% e 14,5% para os concretos C 30%), o que, por sua vez, contribui para reduzir a diferença em relação ao concreto de referência, mas não o suficiente para alterar a tendência geral de decréscimo do teor crítico.

Figura 16 - Relação entre o percentual de RTM e o coeficiente de difusão e o índice de vazios

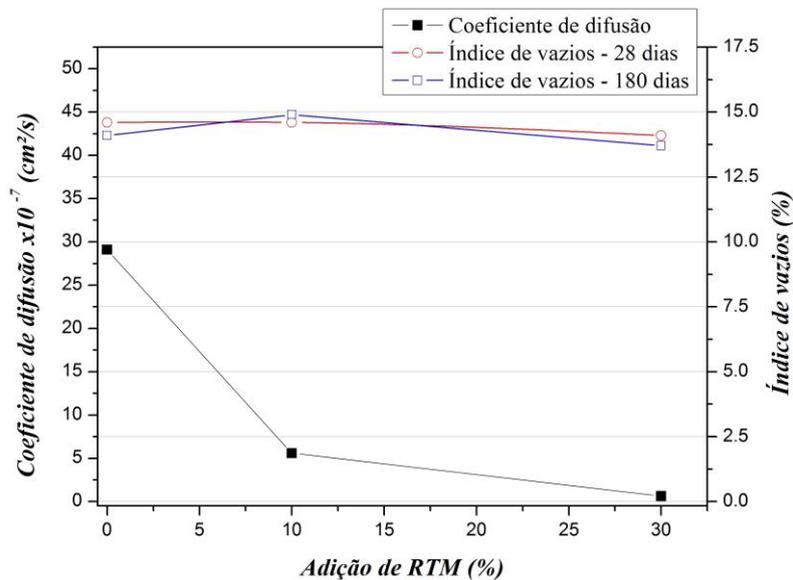
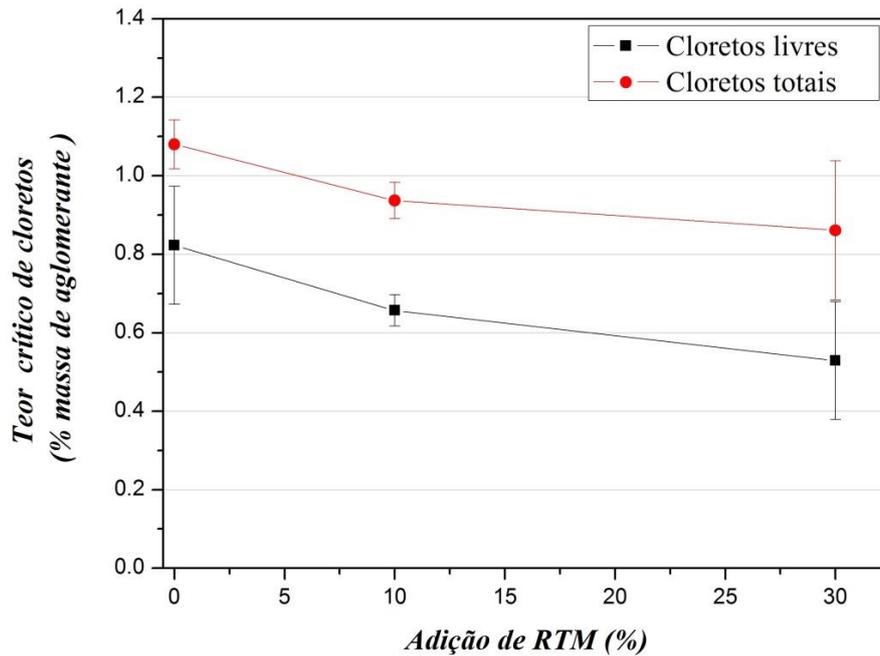


Tabela 4-Relação entre cloretos combinados e totais para as diversas dosagens

Camada (mm)	Proporção de cloretos combinados em relação aos cloretos totais (média/desvio)		
	Referência	C 10%	C 30%
0 – 1	0,31 ± 0,04	0,30 ± 0,05	0,34 ± 0,06
1 – 6	0,27 ± 0,06	0,34 ± 0,05	0,27 ± 0,04
6 – 11	0,28 ± 0,06	0,29 ± 0,09	0,28 ± 0,05
11 – 16	0,29 ± 0,11	0,30 ± 0,06	0,32 ± 0,11
16 – 21	0,25 ± 0,08	0,30 ± 0,04	0,32 ± 0,12

Figura 17 - Teores críticos de cloretos livres e totais em função da adição de RTM



### Análise geral em relação à corrosão

Embora a adição de RTM conduza a uma diminuição inicial da resistência mecânica do concreto, essa redução tende a ser minimizada com o tempo (Tabela 2), mantendo-se dentro de patamares aceitáveis (abaixo de 20% para 180 dias), o que revela a ação pozolânica do RTM (JERÔNIMO *et al.*, 2013). Esse efeito possivelmente contribuiu para o refinamento dos poros e aumento da tortuosidade, e, embora não tenha sido capaz de reverter o comportamento da resistência no período analisado (180 dias), é possível que tenha começado a impactar nas medidas de absorção. Como consequência desses últimos aspectos e, principalmente, da maior capacidade de fixar cloretos das matrizes com RTM, a velocidade de transporte de cloretos nos concretos com RTM é reduzida, o que contribui para o incremento do período de iniciação da corrosão (considerando-se apenas os aspectos supramencionados).

Quando essa análise se soma ao comportamento do teor crítico de cloretos, observa-se que, no caso do emprego de 10% de RTM, o efeito de redução desse teor se sobrepõe ao ganho na redução da velocidade de transporte de cloretos, reduzindo levemente (16%) o período de iniciação da corrosão para essa dosagem. Fato inverso ocorre em relação ao emprego de 30% de RTM, que faz prevalecer a redução significativa na velocidade de transporte, prolongando o período de iniciação da corrosão.

### Conclusões

A adição de RTM ao concreto tende a reduzir a resistência mecânica do material. Contudo, essa redução é minimizada com o avanço das reações pozolânicas ao longo do tempo.

A adição de RTM contribui para a redução da velocidade de transporte dos íons cloreto, refletindo-se nos valores do coeficiente de difusão. Esse comportamento decorre da maior capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia dos concretos com RTM e, possivelmente, também por um refinamento dos poros e aumento da tortuosidade da rede porosa.

Os valores dos teores críticos de cloretos livres e totais tendem a diminuir com a substituição de cimento por RTM, em virtude da redução de alcalinidade dos concretos que incorporam esse tipo de resíduo.

Por fim, é importante colocar que, embora ocorra redução de resistência com a incorporação de RTM ao concreto, ela se mantém dentro de limites aceitáveis com o avanço da hidratação do material (abaixo de 20% para 180 dias). No que se refere à corrosão de armaduras, embora haja diminuição no teor crítico de cloretos com a incorporação de RTM, ocorrem ganhos em relação à redução na velocidade de transporte de cloretos, que podem alargar consideravelmente o período de iniciação da corrosão e se sobrepõem à perda de desempenho inicial, o que possibilita a dosagem de concretos com RTM com bom desempenho em relação à corrosão por cloretos.

## Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-114**: standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. Philadelphia, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 876**: standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 2009
- ANDRADE, C. **Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras**. Madrid: CSIC/IETcc, 1988.
- ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of Skin Effects on Diffusion Process in Concrete. In: NILSSON, L. O.; OLLIVIER, J. P. (Eds.). INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE, Paris, 1995. **Proceedings...**, Paris: RILEM; 1997.
- ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; D'ANDREA, R. Measurements of Ageing Effect on Chloride Diffusion Coefficients in Cementitious Matrices. **Journal of Nuclear Materials**, v. 412, n. 1, p. 209-216, 2011.
- ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. Critical Chloride Content in Reinforced Concrete: state of the art. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE REPAIR, REHABILITATION AND RETROFITTING, 2., Cape Town, 2008. **Proceedings...** Cape Town, 2008.
- ANGST, U. M. *et al.* Chloride Induced Reinforcement Corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**, v. 53, n. 4, p. 1451-1464, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5743**: cimento Portland: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 65**: cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland: índice de atividade pozolânica com cimento: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.
- BANFORTH, P. B.; CHAPMAN-ANDREWS, J. F. Long Term Performance of R C Elements under UK Coastal Exposure Conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE, Sheffield, 1994. **Proceedings...** Sheffield: Shiefuekd Academic Press, 1994.
- BANFORTH, P. B. The Derivation of Input Data for Modelling Chloride Ingress From Eight-Year UK Coastal Exposure Trials. **Magazine of concrete Research**, v. 51, p. 87-96, 1999.
- BEKTAS, F. Alkali Reactivity of Crushed Clay Brick Aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 79-85, 2014.
- CABRAL, A. E. B. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida Por Cloretos**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini, 1997.

- CASTRO, P.; VÉLEVA, L.; BALANCÁN, M. Corrosion of Reinforced Concrete in a Tropical Marine Environment and in Accelerated Tests. **Construction and Building Materials**, v. 11, p. 75-81, 1997.
- CASTRO, P.; DE RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of Chloride Profiles From Concretes Exposed to Tropical Marine Environments. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 529-537, jan. 2001.
- CIGNA, R. *et al.* **Corrosion and Protection of Metals in Contact With Concrete**. Luxembourg, 1997.
- COSTA, A.; APPLETON, J. Análises da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas a Ambiente Marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 46, p. 3-13, 2007.
- ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M.; HOPE, B. B. Binding of Chloride in Mortar Containing Admixed or Penetrated Chlorides. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1525-1533, 1994.
- GARCÍA-ALONSO, M. C. *et al.* Corrosion Behaviour of New Stainless Steels Reinforcing Bars Embedded in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1463-1471, 2010.
- GLASS, G. K.; HASSANEIN, A. M.; BUENFELD, N. R. Monitoring the Passivation of Steel in Concrete Induced by Cathodic Protection. **Corrosion Science**, v. 39, n. 8, p. 1451-1458, 1997.
- GJØRV, O. E.; VENNESLAND, Ø. Diffusion of Chloride Ions From Seawater Into Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 9, n. 2, p. 229-238, 1979.
- HAUSMANN, D. A. Steel Corrosion in Concrete: how does it occur? **Materials Protection**, v. 6, n. 11, p. 19-23, 1967.
- JERÔNIMO, V. L. *et al.* Produção de Concreto autoadensável Com Resíduos de Tijolos Moídos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3., São Leopoldo, 2013. **Anais...** São Leopoldo, 2013.
- KISHIMOTO, I. Experimental Study on the Corrosion Condition of Steel Bars in Cracked Reinforced Concrete Specimen. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE AGEING MANAGEMENT & MAINTENANCE OF NUCLEAR POWER PLANTS, Tokyo, 2010. **Proceedings...** Tokyo, 2010.
- LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos Com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. São Paulo, 2001. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- MEIRA, G. R. *et al.* Chloride Penetration Into Concrete Structures in the Marine Atmosphere Zone: relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 9, p. 667-676, 2007.
- MEIRA, G. R. *et al.* Durability of Concrete Structures in Marine Atmosphere Zones: the use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 667-676, 2010.
- MEIRA, G. R. *et al.* Analysis of Chloride Threshold From Laboratory and Field Experiments in Marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.
- NYGAARD, P. V.; GEIKER, M. R. A Method For Measuring the Chloride Threshold Level Required to Initiate Reinforcement Corrosion in Concrete. **Materials and Structures**, v. 38, p. 489-494, 2005.
- OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de Concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., São Paulo, 2001. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001.
- OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of Recycled Aggregate Concrete Monitored by Durability Indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179-185, 2002.
- OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. **Estudo da Água do Poro de Pasta de Cimento de Escória Pelo Método de Água de Equilíbrio**. São Paulo, 2000. Boletim técnico da Escola politécnica da USP. BT/PCC/259.
- PAGE, C. L. Mechanism of Corrosion Protection in Reinforced Concrete Marine Structures. **Nature**, v. 258, p. 514-515, 1975.
- PAGE, M. M. *et al.* Ion Chromatographic Analysis of Corrosion Inhibitors in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 73-81, 2002.

- RILEM.TC 178-TMC:analysis of total chloride content in concrete. **Materials and Structures**, v. 35, p. 583-585, 2002a.
- RILEM. TC 178-TMC: analysis of water soluble chloride content in concrete. **Materials and Structures**, v. 35, p. 586-588, 2002b.
- SANDBERG, P. Factors Affecting the Chloride Thresholds For Uncracked Reinforced Concrete Exposed in a Marine Environment: part I: field exposure tests of reinforced concrete. **Concrete Science and Engineering**, v. 1, p. 92-98, 1999.
- SANTOS, L. **Avaliação da Resistividade Elétrica do Concreto como Parâmetro Para a Previsão da Iniciação da Corrosão Induzida Por Cloretos em Estruturas de Concreto**. Brasília, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- SILVA, F. G. **Estudo de Concretos de Alto desempenho Frente à Ação de cloretos**. São Carlos, 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- TAVARES, L. M.; COSTA, E. M.; ANDRADE, J. J. O. Estudo do Processo de Corrosão Por Íons Cloreto no Concreto Armado Utilizando Barras de Aço Comum e Barras de Aço Galvanizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, Foz do Iguaçu, 2006. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMat, 2006.
- THOMAS, M. Chloride Thresholds in Marine Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 513-519, 1996.
- TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Potential For Use of Crushed Waste Calcined-Clay Brick as a Supplementary Cementitious Material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1357-1365, 2007.
- TREADAWAY, K. Corrosion Period. In: SCHIESSL, P. (Ed.). *Corrosion of Steel in Concrete*. London: Chapman and Hall, 1988.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Sweden: CBI, 1982.
- TYDLITAT, V. *et al.* Hydration Heat Development in Blended Cements Containing Fine-Ground Ceramics. **Thermochimica Acta**, v. 543, n. 1, p. 125-129, 2012.
- VÁZQUEZ, E. *et al.* Improvement of Durability of Concrete With Recycled Aggregates in Chloride Exposed Environment. **Construction and Building Materials**, v. 67, part A, p. 61-67, set. 2014.
- VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao Estudo de Corrosão de Armaduras em Concretos Armados Com Adição de Sílica Ativa**. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade Técnica da Utilização de Concretos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.
- VIEIRA, A. A. P. **Estudo do Aproveitamento do Resíduo de Cerâmica Vermelha Como Substituição Pozolânica em Argamassas e Concretos**. João Pessoa, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.
- VEJMEJKOVA, E. *et al.* Properties of High Performance Concrete Containing Fine-Ground Ceramics as Supplementary Cementitious Material. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 1, p. 55-61, 2012.
- WHEAT, H. G. Using Polymers to Minimize Corrosion of Steel in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 1, p. 119-126, 2002.
- YU, H. *et al.* Laboratory Investigation of Reinforcement Corrosion Initiation and Chloride Threshold Content For Self-Compacting Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 1507-1516, 2010.
- ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S. Permeability of Recycled Aggregate Concrete Containing Fly Ash and Clay Brick Waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, n. 1, p. 175-182, may 2014.

## Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), pelo auxílio e disposição no uso de suas instalações; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Finep, pela concessão de bolsas e financiamento do projeto.

**Gibson Rocha Meira**

Departamento de Construção Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba | Av. 1º de maio, 720, Jaguaribe | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58015-430 | Tel.: (83) 3208-3000 | E-mail: gibsonmeira@yahoo.com

**Pablo Ramon Rodrigues Ferreira**

Coordenação de Obras de Engenharia | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba | E-mail: pablo.r06@hotmail.com

**Valdith Lopes Jerônimo**

Departamento de Construção Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba E-mail: valdithlopes@hotmail.com

**Arnaldo Manuel Pereira Carneiro**

Departamento de Engenharia civil, Centro de Tecnologia | Universidade Federal de Pernambuco | Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária | Recife - PE - Brasil | CEP 50740-530 | Tel.: (81) 2126-8220 Ramal 35 | E-mail: ampc@ufpe.br

***Revista Ambiente Construído***

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Telefone: +55 (51) 3308-4084  
Fax: +55 (51) 3308-4054  
[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)  
E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)