

Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado

Review of accelerated tests for the induction of corrosion triggered by chlorides in reinforced concrete

Gibson Rocha Meira
Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

Resumo

A corrosão de armaduras desencadeada por cloretos é um dos principais problemas que afetam as estruturas de concreto armado. Considerando o estudo desse tipo de problema, a velocidade na coleta dos dados, a possibilidade de controle das variáveis que influenciam o processo de corrosão e o baixo custo na realização dos testes têm sido aspectos motivadores da opção por realizar ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos em vez de ensaios baseados em exposição natural. Com o decorrer dos anos, embora tenha havido evolução nos procedimentos adotados nos ensaios acelerados, ainda não há uma padronização amplamente praticada nas pesquisas. Este trabalho faz uma revisão sobre as principais metodologias de ensaio empregadas para induzir a corrosão por cloretos praticadas no Brasil e no mundo, discutindo suas vantagens e desvantagens e gerando uma reflexão em relação à padronização de procedimentos. Nesse sentido, sugere, entre outros aspectos, o emprego de procedimentos de ensaios acelerados que guardem proximidade com condições reais de exposição e a padronização nos critérios empregados na identificação da despassivação da armadura e na preparação dos corpos de prova. Essas ações contribuem para diminuir a variabilidade de resultados e facilitam a comparação entre estudos de natureza semelhante.

Palavras-chave: Cloretos. Concreto armado. Corrosão. Ensaios acelerados.

Abstract

Reinforcement corrosion triggered by chlorides is one of the main problems that affects reinforced concrete structures. Considering the study of this kind of problem, the speed of data collection, the possibility of controlling the variables that influence the corrosion process and the low cost of carrying out these tests have been encouraging aspects for carrying out laboratory accelerated tests rather than testing based on natural exposure. Over the years, although the procedures adopted in accelerated tests have improved, research in the field is still lacking widely used standardisation. This study undertakes a review of the main testing methodologies used to induce corrosion triggered by chlorides in Brazil and internationally, discussing their advantages and disadvantages and generating a reflection about the standardisation of procedures. Hence, it proposes, among other aspects, the use of accelerated testing procedures that keep a proximity with real exposure conditions, the standardisation of the criteria used to identify reinforcement depassivation, as well as of specimens preparation. These actions can contribute to reduce data variability and facilitate comparisons among similar studies.

Keywords: Chlorides. Reinforced concrete. Corrosion. Accelerated tests.

¹Gibson Rocha Meira

¹Instituto Federal de Educação
João Pessoa - PB - Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-2010-5315>

²Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

²Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

Recebido em 02/06/18

Aceito em 27/02/19

Introdução

A ação dos íons cloreto é uma das principais responsáveis por desencadear a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Embora ainda haja dúvidas em relação ao modo como ocorre a ruptura da capa passiva e a ativação das armaduras, vários esforços em pesquisa têm sido feitos no sentido de estudar a ação dos cloretos sobre estruturas de concreto.

Esses estudos envolvem aspectos como influência de características dos materiais e do ambiente no transporte de cloretos (TUUTTI, 1982; PAGE; HAVDAHL, 1985; JAEGERMANN, 1990; THOMAS, 1996), modelagem do transporte de cloretos e da propagação da corrosão (SAETTA; SCOTTA; VITALIANI, 1993; TANG; NILSSON, 1993; GUIMARÃES, 2000) e caracterização dos níveis de presença salina em zona de atmosfera marinha e sua interação com estruturas de concreto (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; MORCILLO *et al.*, 1999; MEIRA, 2004). No entanto, esses estudos podem ser agrupados entre aqueles que se dedicam à fase de iniciação da corrosão e aqueles que envolvem a fase de propagação da corrosão, estes de forma isolada ou conjunta com a primeira fase. Outro aspecto a ser destacado é que a grande maioria desses estudos envolve a realização de ensaios acelerados em laboratório, com metodologias próprias que nem sempre podem ter seus resultados comparados.

Sobre a realização de ensaios acelerados, embora haja aspectos que os distanciem das condições reais de exposição, em que uma multiplicidade de ações ocorre de forma simultânea e aleatória, é um caminho necessário, pois a obtenção de resultados em ensaios em condições naturais de exposição pode ser extremamente demorada, o que inviabiliza seu emprego de forma regular. O importante nesse cenário é definir estratégias de ensaio acelerados que os aproxime, de forma direta ou através de fatores de correção das condições de aplicação reais dos materiais. Outro aspecto a ser ponderado em relação aos ensaios acelerados é que, uma vez que eles demandam menor tempo para a obtenção de resultados, também envolvem menor custo operacional.

Nesse sentido, ensaios acelerados focados no transporte de cloretos, embora ainda não tenham sido objeto de padronização no Brasil, avançaram significativamente nos últimos anos no cenário internacional, resultando em documentos normativos como aqueles propostos pela C1202 (AMERICAN SOCIETY..., 2018a), E1573 (AMERICAN SOCIETY..., 2018b), T259 (AMERICAN ASSOCIATION..., 2002), T277 (AMERICAN ASSOCIATION..., 2015), NT

BLUID 443 (NORDTEST..., 1995), NT BLUID 492 (NORDTEST..., 1999) e EN 12390-11 (EUROPEAN..., 2015). Por outro lado, a padronização de ensaios focados na indução da corrosão por cloretos, ou seja, que envolvem a despassivação da armadura e, eventualmente, o avanço do processo de corrosão, avançou menos em relação à uniformização de procedimentos.

Nesse cenário, as pesquisas relacionadas à indução da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado apresentam algumas dificuldades em relação à análise dos resultados obtidos. Primeiro, o processo de corrosão envolve incertezas em relação à despassivação, com idas e vindas antes que a corrosão se instale de forma consistente. Segundo, há o emprego de uma diversidade de metodologias experimentais, as quais produzem resultados que sofrem influência direta de cada uma delas. Terceiro, a utilização de diferentes técnicas de monitoramento e avaliação do estado de corrosão da armadura, bem como dos critérios empregados nesse tipo de avaliação apresentam suas particularidades e limitações, produzindo significativa variabilidade de resultados. Além disso, o concreto armado apresenta respostas diferentes em função da idade, do ambiente de exposição, do modo de confecção e aplicação (TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009). Por fim, pode-se agregar que parte dos elementos acima mencionados depende de uma adequada infraestrutura laboratorial, com alguns equipamentos de custo significativo, nem sempre disponíveis nos laboratórios.

Considerando as pesquisas relacionadas à indução da corrosão por cloretos, diferentes abordagens foram utilizadas por pesquisadores em ambiente de laboratório objetivando simular as condições reais de exposição. Parte desses estudos foi realizada dispondo a armadura em solução alcalina, com cloretos adicionados a essa solução, de modo a simular o meio no qual a armadura está exposta no concreto. Esse tipo de ambiente pode ter facilmente o pH e a concentração de cloretos alterados com precisão, a critério do pesquisador (ANGST *et al.*, 2009; TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009). Quando se utiliza pasta de cimento, argamassa ou concreto, a penetração de cloreto em corpos de prova endurecidos se torna mais demorada, e a quantificação da concentração de cloretos presente na superfície do aço é mais difícil e laboriosa (TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009).

Além da simulação da fase líquida presente nos poros de matrizes cimentícias, os pesquisadores têm empregado como principais métodos para indução da corrosão a adição de cloretos à água de

amassamento do concreto ou argamassa (ARYA; XU, 1994; PAGE *et al.*, 2002; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007), a aplicação de campo elétrico para acelerar a penetração de cloretos no concreto a partir de um reservatório contendo solução salina (CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2002; TREJO; PILLAI, 2003), a submissão de concretos a ciclos de secagem e umedecimento (GLASS; HASSANEIN; BUENFELD, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006) e a exposição de concretos à difusão pura por imersão ou através do ensaio de *salt ponding test* (JOUKOSKI *et al.*, 2004; CHIANG; YANG, 2007).

Variações nos procedimentos de ensaio para indução da corrosão por cloretos podem influenciar no tempo para início da corrosão, no mecanismo de transporte, no comportamento eletroquímico da barra e no teor crítico de cloretos (ANGST *et al.*, 2009). Nesse sentido, esses métodos de ensaio carecem de ser confrontados com situações reais de exposição, de modo a correlacionar os resultados, conforme procedimento realizado por Meira *et al.* (2014) em relação ao teor crítico de cloretos.

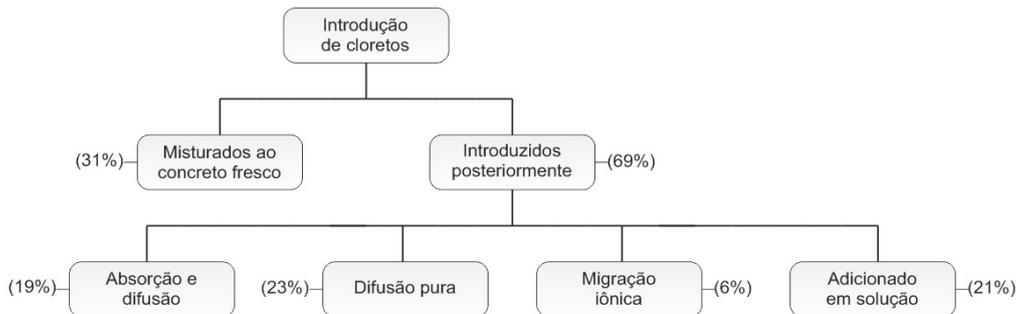
As Figuras 1 e 2 resumem as formas como os cloretos têm sido introduzidos em ensaios acelerados de indução da corrosão nos cenários internacional e nacional respectivamente. Os resultados apresentados na Figura 1 advêm do

trabalho publicado por Angst e Vennesland (2009), enquanto que os dados apresentados na Figura 2 representam percentuais relativos às publicações nacionais trabalhadas na presente revisão.

No cenário internacional, a forma de introdução de cloretos em ensaios acelerados mais empregada é a adição salina à massa de concreto (mistura ao concreto fresco), seguida por ensaios que empregam difusão pura, adicionados em solução (simulando a fase líquida do concreto/argamassa) e absorção/difusão (Figura 1). No cenário nacional, a forma mais empregada compreende os ensaios com mecanismo de transporte por ação conjunta de absorção e difusão (Figura 2), com os ciclos de imersão e secagem prevalecendo.

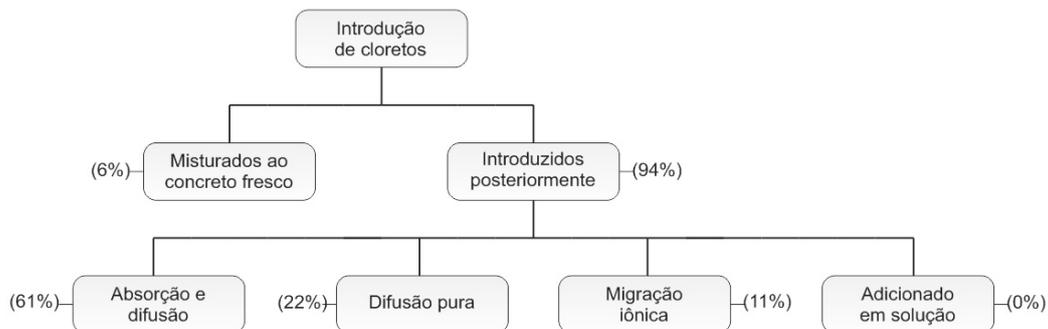
Como se pode observar, ainda há uma significativa variabilidade nos tipos e procedimentos de ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos, mesmo com décadas de pesquisas. Partindo desse pressuposto e considerando a corrosão de armaduras desencadeada por cloretos, o presente trabalho apresenta o estado da arte sobre ensaios acelerados de indução da corrosão por cloretos no Brasil e no mundo. Com isso, visa contribuir para a padronização futura de ensaios, bem como para minimizar falhas na condução dos ensaios e interpretação de resultados.

Figura 1 - Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de indução da corrosão - cenário internacional



Fonte: adaptado de Angst e Vennesland (2009).

Figura 2 - Formas de introdução de cloretos em ensaios de indução da corrosão - cenário nacional



Estado da arte das pesquisas no Brasil e no mundo

A introdução de cloretos no interior do concreto ocorre de diferentes maneiras, porém a exposição a ambientes marinhos e a saís de degelo são as causas mais comuns da degradação de estruturas por corrosão de armaduras desencadeada por cloretos (CASCUDO, 1997; TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009).

Um dos primeiros estudos na área de corrosão de armaduras originada pela ação de cloretos em elementos de concreto armado foi desenvolvido na Alemanha em 1959 por H. Kaesche (KAESCHE, 1959), em que se buscou estudar os riscos de corrosão em elementos de concreto armado causados pela adição de aditivos aceleradores de pega. Ainda no mesmo ano, A. Bäumel publicou um dos primeiros estudos sobre a durabilidade de concretos calcários com adição de cloretos à massa de concreto (BÄUMEL, 1959). Além da Alemanha, países como Suécia, Espanha, EUA e Reino Unido tiveram importantes papéis na formação do conhecimento dessa área (ANGST *et al.*, 2011a), tendo como principal motivo para o início das pesquisas os danos oriundos da adição de saís de degelo na superfície de estruturas reais de concreto armado e da exposição desse tipo de estrutura a ambientes sob influência marinha.

As primeiras pesquisas acerca da corrosão iniciada por cloretos eram desenvolvidas em ambiente de laboratório com dois principais procedimentos de ensaio: adição de cloretos à massa de uma matriz cimentícia; e imersão da armadura em solução alcalina com cloretos. Contudo, a partir da segunda metade da década de 1980, o número de trabalhos aumentou consideravelmente, e novas estruturas de ensaio, com características mais realistas, foram incorporadas às pesquisas.

De modo mais recente, estudos tentam desenvolver modelos matemáticos para previsão de vida útil para estruturas de concreto armado usando ferramentas probabilísticas ou semiprobabilísticas, tendo o teor crítico de cloretos como parâmetro que alimenta esses modelos para a tomada de decisão. Os resultados desses modelos matemáticos são comparados com os valores obtidos de estruturas em condições reais de exposição, almejando desenvolver parâmetros mais realistas para a concepção de novas estruturas e condições mais

precisas para a avaliação das estruturas existentes (GULIKERS, 2006).

No Brasil, um dos primeiros trabalhos mais abrangentes relacionados à corrosão por cloretos foi publicado em 1981, por Paulo Helene, no Simpósio de Aplicação de Tecnologias do Concreto, intitulado “Corrosão de armaduras em concreto armado” (HELENE, 1986). Porém, um colóquio realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em 1972 divulgou os principais trabalhos da época voltados para a durabilidade de estruturas de concreto armado (TORRES, 2010). Em seguida, muitos outros trabalhos surgiram, como, por exemplo, o realizado por Maryangela G. Lima em 1990 (LIMA, 1990), Osvaldo Cascudo em 1991 (CASCUDO, 1991), Enio J. Pazini Figueiredo em 1994 (FIGUEIREDO, 1994), Gibson Rocha Meira em 2004 (MEIRA, 2004), Marcelo Henrique F. de Medeiros em 2008 (MEDEIROS, 2008) e Ronaldo Alves de Medeiros Júnior em 2014 (MEDEIROS JÚNIOR, 2014). Hoje, o Brasil conta com bons centros de pesquisa acerca do tema, espalhados por todo o país. As regiões com maiores concentrações de trabalho são o Sudeste e o Sul, seguidos pelo Nordeste e o Centro-Oeste (TORRES, 2010).

Considerando a base bibliográfica empregada na elaboração deste estudo, foram montados os Quadros 1 e 2. Eles mostram as principais características dos ensaios empregados na indução da corrosão por cloretos, tomando como referência os cenários nacional (Quadro 1) e internacional (Quadro 2). Adotou-se como critério para a escolha dos trabalhos o emprego de corpos de prova confeccionados com armadura de aço envoltos por matriz cimentícia (concreto ou argamassa) submetidos à ação de cloretos.

A seguir, discutem-se as características dos principais ensaios empregados na indução da corrosão por cloretos.

Métodos acelerados de indução da corrosão em concretos armados

Cumprir aqui esclarecer que não é objetivo desta seção apresentar todos os métodos acelerados de indução da corrosão para concreto armado, mas comentar sobre aqueles com maior representatividade na literatura, discutindo sobre suas vantagens e desvantagens.

Quadro 1 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos em pesquisas realizadas no Brasil (Continua...)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Adição de cloretos à massa de concreto	Medeiros <i>et al.</i> (2017)	Adição de NaCl na taxa de 1% da massa de cimento e imersão total em água por 2 dias	12 CPs prismáticos de 15x15x45 cm, cobrimento 1 cm e 3 cm, barra com Ø 10 mm com limpeza química	Desmoldagem com 24 h e 69 dias em ambiente controlado
Imersão e secagem	Cavalcanti Filho (2010)	Secagem ao ar livre por 21 dias e imersão total (3,5% NaCl) por 1 dia	12 CPs cilíndricos de 15x Ø15 cm, cobrimento 1,5 cm, 2,5 cm e 3,5 cm, barra de CA50, Ø 10 mm sem limpeza	91 dias em imersão total de cal saturada
Imersão e secagem	Silva (2010)	Secagem em estufa (50 °C) por 5 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 2 dias	4 CPs prismáticos de 15x15x15 cm, cobrimento 2 cm e 2,5 cm, 2 barras de CA60, Ø 5,0 mm com limpeza mecânica	28 dias em câmara úmida e 30 dias ao ar livre
Imersão e secagem	Portella <i>et al.</i> (2006)	Secagem por 5 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 2 dias	CPs prismáticos de 10x9,1x4,9 cm, cobrimento 2 cm, 3 barras de CA50, Ø 6,3 mm	28 dias em câmara úmida
Imersão e secagem	Santos (2006)	Secagem em estufa (50 °C) por 5 dias e imersão parcial (3,0% NaCl) por 2 dias	4 CPs prismáticos de 4,5x7x9 cm, cobrimento 1 cm e 2 cm, 2 barras de CA50, Ø 5,0 mm com limpeza ASTM G1	7 dias em câmara úmida e 71 dias em ambiente de laboratório
Imersão e secagem	Silva (2006)	Secagem em laboratório por 4 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 3 dias	CPs prismáticos de 5x5x12 cm, cobrimento 1 cm e 2 cm, barra de CA50, Ø 10 mm com limpeza ASTM G1	12 dias em câmara úmida e 4 dias em ambiente de laboratório
Imersão e secagem	Tavares, Costa e Andrade (2006)	Secagem em estufa (50±10 °C) por 6 dias e imersão total (5% NaCl) por 3 dias	12 CPs prismáticos de 6x12x12 cm, cobrimento 2,5 cm, 2 barras de CA50, Ø 6,3 mm com limpeza mecânica	Não informado
Imersão e secagem	Vieira e Dal Molin (2004)	Secagem em estufa (50 °C) por 14 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 7 dias	4 CPs prismáticos de 6x10x10 cm, cobrimento 1,5 cm, 2 barras de CA60, Ø 5,0 mm com limpeza mecânica	28 dias em câmara úmida e 14 dias em ambiente controlado
Imersão e secagem	Vieira (2003)	Secagem em laboratório por 5 dias e imersão total (3,5% NaCl) por 5 dias	36 CPs prismáticos de 6x10x10 cm, cobrimento 2,5 cm, 2 barras de CA50, Ø 10 mm com limpeza ASTM G1	28 dias em câmara úmida
Imersão e secagem	Monteiro (2002)	Secagem em estufa (50 °C) por 5 dias e imersão parcial (5% NaCl) por 2 dias	CPs prismáticos de 5,6x12x118 cm, cobrimento 1 cm, 2 cm e 4 cm, barra de CA50, Ø 6,3 mm com limpeza ASTM G1	28 dias em câmara úmida e 15 dias em ambiente de laboratório
Imersão e secagem	Jucá <i>et al.</i> (2001)	Secagem ao ar livre por 5 dias e imersão total (0,5% NaCl) por 2 dias	4 CPs prismáticos de 15x14x15 cm, cobrimento 0,5 cm e 1 cm, barras de CA50, Ø 8,0 mm	7 dias em câmara úmida e 15 dias em ambiente de laboratório
Imersão e secagem	Cabral (2000)	Secagem em estufa (50 °C) por 5 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 2 dias	4 CPs prismáticos de 4,5x8x9 cm, cobrimento 0,5 cm e 1 cm, 4 barras de CA50, Ø10 mm com limpeza ASTM G1	7 dias em câmara úmida e 21 dias em ambiente de laboratório

Quadro 1 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos em pesquisas realizadas no Brasil (continuação)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Eletromi-gração	Miranda <i>et al.</i> (2017)	60 V por 8 h e imersão parcial (3,5% NaCl) por 16 h	6 CPs cilíndricos de 20x Ø 10 cm, barra de CA50, Ø 10 mm e limpeza química	Desmoldados com 24 h e 20 dias imersos em água
Eletromi-gração	Torres (2006)	15, 45 ou 70 V por 8h e imersão parcial (3,5% NaCl) por 16h	12 CPs prismáticos de 10x20x10 cm, cobrimento 3 cm, barra de CA50, Ø 12,5 mm	21 dias em câmara úmida
Câmara de névoa salina	Santos (2010)	Baseado na NBR 8094:1993 por 90 dias (2% NaCl)	3 CPs em forma de pórtico (s. transversal de 4,5x4,5 cm)	28 dias em câmara úmida
Câmara de névoa salina	Portella <i>et al.</i> (2006)	Baseado na ASTM B117, 16 h de pulverização diária a 1 a 2 ml/h (5% NaCl)	CPs prismáticos de 10x9,1x4,9 cm, cobrimento 2 cm, 3 barras de CA50, Ø 6,3 mm	28 dias em câmara úmida
Câmara de névoa salina	Monteiro (2002)	Baseado na ASTM B117, 16 h de pulverização diária a 1 a 2 ml/h (5% NaCl)	CPs prismáticos de 5,6x12x11,8 cm, cobrimento 1 cm, 2 cm e 4 cm, 3 barras de CA50, Ø 6,3 mm com limpeza ASTM G1	28 dias em câmara úmida e 15 dias em ambiente de laboratório
Câmara de névoa salina	Levy (2001)	Baseado na ASTM B117 (5% NaCl)	CPs prismáticos de 10x10x10 cm	14 dias em câmara úmida e 46 dias em ambiente de laboratório

Quadro 2 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos de pesquisas realizadas no mundo (Continua...)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Adição de cloretos à massa de concreto	Liu <i>et al.</i> (2018)	Areia extraída do mar contendo cloretos na taxa de 0,0% a 1,07% da massa	CPs prismáticos de 15x15x15 cm, cobrimento 1 cm, barra com Ø10 mm com limpeza química	Desmoldagem 24 h e 28 dias em ambiente controlado
Adição de cloretos à massa de concreto	Li, Yuan e Li (2011)	Adição de NaCl na taxa de 0,6% a 3% da massa de cimento	6 CPs prismáticos de 100x30x20 cm, cobrimento 4 cm, barra com Ø 12,7 mm	31 dias de imersão em água
Adição de cloretos à massa de concreto e eletromigração	Ann <i>et al.</i> (2010)	Adição de NaCl na taxa de 0% a 3% da massa de cimento, diferença de potencial de 250 mV entre a armadura e um eletrodo externo, solução de 4 M de NaCl	CPs prismáticos de 15x15x15 cm, cobrimento de 2 cm, 2 barras de Ø10,0 mm	Envoltos em filme plástico por 28 dias

Quadro 2 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos de pesquisas realizadas no mundo (continuação)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Adição de cloretos à massa de concreto e eletromigração	Bertolini, Carsana e Pedferri (2007)	Adição de NaCl na taxa de 0,4% a 0,8% da massa de cimento, UR (90%) e T (20 °C) controladas Alternada de 3 A/m ² e 50 A/m ² (demais) com 1h de aplicação e 4h de interrupção	3 CPs prismáticos de 7x7x10 cm, cobrimento de 3 cm, 2 barras de Ø 10,0 mm	Não informado
Adição de cloretos à massa de concreto e imersão	García-Alonso <i>et al.</i> (2007)	Adição de NaCl nas taxas de 0,2% e 4% da massa de cimento e imersão total (3,5% de NaCl) por 2 meses	6 CPs prismáticos de 60x60x10 cm, cobrimento de 4,4 cm, 4 barras de Ø 12,0 mm sem limpeza	Não informado
Adição de cloretos à massa de concreto	Rincón <i>et al.</i> (2008)	Adição de NaCl na taxa de 1% da massa de cimento	6 CPs prismáticos de 120x20x30 cm, cobrimento de 2,5 cm, 4 barras com Ø 10,0 mm e estribo de Ø 5,0 mm	Envolto em filme plástico por 28 dias
Adição de cloretos à massa de concreto	Garcés, Sanchez de Rojas e Climent (2006)	Adição de NaCl nas taxas de 3% e 4% da massa de cimento	CPs prismáticos de 22x20x22 cm, cobrimento de 3 e 5,3 cm, barra com Ø 12,0 mm	28 dias em câmara úmida com umidade >95% e 20 °C
Adição de cloretos à massa de concreto e eletromigração	Maaddawy e Soudk (2003)	Adição de NaCl na taxa de 5% da massa de cimento, densidade de corrente de 100 a 500 µA/cm ² , CPs sempre envolvidos com estopa molhada	3 CPs prismáticos de 30x15x25 cm, cobrimento de 3 cm, 2 barras de Ø 11,3 mm, limpeza ASTM G1	7 dias em câmara úmida e mais 7 em ar seco
Adição de cloretos à massa de concreto e imersão/secagem	Page <i>et al.</i> (2002)	Adição de NaCl nas taxas de 0,3% e 2,4% da massa de cimento, imersos em água por 2 dias e secagem por 28 dias em câmara saturada de MgCl ₂ com UR de 33%	7 CPs prismáticos de 10x10x9 cm, cobrimento de 0,5 cm, 1 cm e 2 cm, 3 barras de Ø 6,3 mm	Não informado
Adição de cloretos à massa de concreto e imersão	Thangavel e Rengaswamy (1998)	Adição de NaCl na taxa de 0% a 3,5% da massa de cimento e imersão total (3,5% de NaCl)	CPs cilíndricos de 5x Ø 5 cm, barra de Ø 20,0 mm, limpeza mecânica e desengordurado com tricloroetileno	7 dias em imersão total em água destilada
Adição de cloretos à massa de concreto e imersão/secagem	Glass, Hassanein e Buenfeld (1997)	Adição de NaCl na taxa de 0% a 3% da massa de cimento e imersos (3,5% de NaCl) por 30 min e secagem por 11,5 h em câmara com UR de 50-70%	17 CPs cilíndricos de 25x Ø 10 cm, cobrimento de 9 cm, barra de Ø 20,0 mm	Envolto em filme plástico por 14 dias e 14 dias em ambiente de laboratório

Quadro 2 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos de pesquisas realizadas no mundo (continuação)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Adição de cloretos à massa de concreto	Arya e Xu (1994)	Adição de NaCl na taxa de 0,2% a 2,5% da massa de cimento	CPs prismáticos de 60x18x5 cm, cobrimento 2,5 cm, barra com Ø 8,0 mm	3 a 180 dias de imersão em água
Adição de cloretos à massa de concreto e eletromigração	Andrade, Alonso e Molina (1993)	Adição de NaCl na taxa de 3% da massa de cimento, densidade de corrente de 3 ou 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	CPs prismáticos de 15x15x38 cm, cobrimento 2 cm e 3 cm, barra de Ø 20,0 mm	28 dias em imersão em água
Adição de cloretos à massa de concreto	Monteiro, Gjrv e Mehta (1985)	Adição de CaCl_2 na taxa de 2% da massa de cimento	Barra com Ø 19,0 mm e limpeza mecânica	Envoltos em filme plástico por 180 dias (20 °C)
Imersão simples	Gjrv e Venesland (1979)	Imersão total em água do mar, temperatura de 7 ± 2 °C (exposição ao ar livre) e 20 ± 2 °C (exposição em ambiente de laboratório)	3 CPs cilíndricos de 28x Ø 10 cm, cobrimento de 4,5 cm, barras de Ø 10,0 mm	2 a 3 meses em imersão em água
Imersão e secagem	Rivera-Corral <i>et al.</i> (2017)	Secagem em câmara ($50\pm 10\%$ UR) por 3 dias e imersão parcial (3,5% NaCl) por 4 dias	6 CPs prismáticos de 17,5x9x15 cm, cobrimento 4 cm, barra Ø 10,0 mm	Desmoldagem com 24 h e mais 28 dias em câmara úmida (20 ± 1 °C e 100% de UR)
Imersão e secagem	Angst <i>et al.</i> (2011a)	Secagem em temperatura ambiente por 5 dias e imersão total (1,1 a 1,8 mol/l NaCl) por 5 dias	4 CPs prismáticos de 12x8,4x14 cm, cobrimento 0,5 cm, 1 cm e 2 cm, 2 barras Ø 8,0 mm sem limpeza	Envoltos em filme plástico por 28 dias em câmara com temperatura de 20 °C e 13 dias em ambiente de laboratório
Imersão e secagem	Kishimoto (2010)	Secagem em estufa (60 ± 3 °C) por 6 h e imersão total (3,2% NaCl) por 6 h	6 CPs prismáticos de 10x10x30 cm, cobrimento 5 cm, barra Ø 10.0 mm	Não informado
Imersão e secagem	Wheat (2002)	Secagem em temperatura ambiente por 4 dias e imersão total (3,5% NaCl) por 4 dias	6 CPs cilíndricos de 15,2x Ø 7,6 cm, cobrimento 5 cm, barra Ø 13,0 mm	28 dias em câmara úmida e mais 30 dias em ar seco
Eletromigração	Abosrra, Ashour e Youseffi (2011)	Aplicação de uma corrente contínua de 0,4 A, duração de 1, 7 ou 15 dias e totalmente imersos em solução (3% NaCl)	CPs prismáticos de 15x15x15 cm, cobrimento de 6,9 cm, barra Ø 12 mm	25 dias em câmara úmida
Eletromigração	Prabakar, Manoharan e Neelamegam (2009)	Aplicação de uma diferença de potência de 5 V, duração de 20 dias e totalmente imersos em solução (3,5% NaCl)	3 CPs cilíndricos de 10x Ø 7,5 cm, cobrimento de 3,15 cm, barra Ø 12,0 mm sem limpeza	28 dias imerso em água

Quadro 2 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos de pesquisas realizadas no mundo (continuação)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Eletromigração	Spainhour e Wootton (2008)	Aplicação de uma corrente contínua de 5 A/mm ² , duração de 50 dias e parcialmente imersos em solução (5% NaCl)	CPs cilíndricos de 10,2x Ø 5,1 cm, cobrimento de 1,92 cm, barra Ø 12,7 mm, limpeza segundo ASTM G1	Cura por 31 dias em câmara com temperatura de 24 °C
Eletromigração	Huang e Yang (1997)	Aplicação de uma corrente contínua de 5 A/mm ² e parcialmente imersos em solução (3,5% NaCl) (após a corrosão foi aplicada uma carga de 100 toneladas)	Durante a moldagem foi feito um corte de 1 mm por 1 cm de profundidade no meio do CP 2 CPs prismáticos de 50x15x15 cm, cobrimento de 3 cm, 2 barras de Ø 12,7 mm	28 dias imerso em água
Câmara de névoa salina	Kishimoto (2010)	Segundo JIS-H-8502; ciclo de 2 h na câmara de névoa salina (50 g/l de NaCl), 4 h de secagem (60 °C ± 1, UR = 20% e 30%) e 2 h em câmara úmida secagem (50 ± 1 °C, UR>95%); duração total do ensaio de 3, 6 e 9 semanas	6 CPs prismáticos de 10x10x30 cm, cobrimento de 5 cm, 2 barras de Ø 10 mm	Não informado
Câmara de névoa salina	Rincón <i>et al.</i> (2008)	Pulverizados 1 vez por semana em câmara destinada a esse fim, solução de 3,5% de NaCl	6 CPs prismáticos de 120x20x30 cm, cobrimento de 2,5 cm, 4 barras com Ø 10 mm e estribo de Ø 5 mm	Envoltos em filme plástico por 28 dias
Câmara de névoa salina	Castro, Véleva e Balancán (1997)	Segundo especificações da ISO 9227, temp. controlada de 35 °C, aspersão de 1 a 2 ml/h (5% NaCl) durante um período de 4 a 16 meses	2 CPs prismáticos de 15x7,5 cm, cobrimento de 3,28 cm, barra de Ø 9,5 mm, sem limpeza	1, 3 e 7 dias em imersão em água
Piscina ou <i>salt ponding test</i> e secagem	Otieno, Alexander e Beushausen (2008)	Aplicação da piscina com a solução (5% de NaCl) por 3 dias e secagem por 28 dias em ambiente de laboratório	Indução de fissuração (0,4 mm e 0,7 mm) no meio do CP após a cura 3 CPs prismáticos de 50x10x10 cm, cobrimento de 4 cm, barra de Ø 10 mm, limpeza mecânica	28 dias em câmara úmida com temperatura de 23±2 °C e 10 dias ao ar livre

Quadro 2 - Características dos ensaios acelerados para indução da corrosão por cloretos de pesquisas realizadas no mundo (continuação)

Tipo de ensaio	Referência	Características		
		do ensaio	dos corpos de prova	da cura
Piscina ou <i>salt ponding test</i> e eletromigração	Yoon <i>et al.</i> (2000)	1º estágio: ciclos de aplicação da piscina (5% de NaCl) por 4 dias e 3 dias secagem por 28 dias 2º estágio: aplicação de uma diferença de potencial de 10 V por 8 dias	Após a cura, os CP foram submetidos a quatro cargas pontuais (20% a 70% da carga de ruptura) de modo a gerar fissuras 2 CPs prismáticos de 117x10x15 cm, cobrimento de 3 cm, barra de Ø 10 mm	28 dias em câmara úmida com umidade (UR de 95% e T de 22 °C)
Piscina ou <i>salt ponding test</i>	Raupach (1995)	Aplicação da piscina com a solução (1% de Cl ⁻) por 24 h a cada semana, sem a aplicação da piscina, CPs conservados em câmara com umidade de 80%	Os CPs foram previamente fissurados (0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm e 0,5 mm); 4 CPs prismáticos de 70x15x10 cm, cobrimento de 1,5 cm e 3,5 cm, 3 barras de Ø 14 mm	28 dias em câmara úmida com umidade (UR de 80% e T de 20 °C)

Adição de cloretos à massa de concreto

Essa metodologia acelerada de indução da corrosão por cloretos consiste em adicionar certas quantidades preestabelecidas de íons cloreto ao traço do concreto; em seguida, segundo a literatura consultada, os concretos são submetidos a três condições distintas: exposição em ambiente de laboratório, em câmara climática ou em ciclos de imersão e secagem em água destilada. Os principais sais empregados são o cloreto de sódio (ARYA; XU, 1994; PAGE *et al.*, 2002; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007; ANN *et al.*, 2010) e o cloreto de cálcio (MONTEIRO; GØRV; MEHTA, 1985; ANDRADE; ALONSO; MOLINA, 1993), com maior predominância do primeiro.

A adição de cloretos à massa de concreto fresco foi muito empregada entre as décadas de 1960 e 1980, por sua praticidade e velocidade no início da corrosão. O objetivo dessa técnica é encontrar o teor crítico de cloretos em um rápido espaço de tempo. Esse método de ensaio simula a contaminação de concretos, como através da utilização de agregados contaminados, do uso de aceleradores de pega, etc. Em tempos atuais, esses tipos de contaminação são improváveis pelas limitações impostas pelas normas (ANDRADE, 2001). Portanto, trata-se de

um método de ensaio que não apresenta similaridade com situações usuais existentes na realidade. No entanto, pode ser útil na análise comparativa de materiais, principalmente em função de sua velocidade de resposta.

Uma vez que se adicionam cloretos à massa de concreto, a concentração de cloretos total em todas as amostras fica homogênea distribuída e bem definida. Por outro lado, essa técnica de ensaio impossibilita a formação de um perfil de cloretos – importante para o estudo da evolução do ingresso de cloretos –, afeta a porosidade do material em função das ligações entre os cloretos e as fases hidratadas do cimento e, por fim, compromete a formação da película passivadora se a concentração for demasiado elevada (ANGST *et al.*, 2011a).

Embora uma distribuição homogênea de cloretos nas amostras facilite a aferição da concentração de cloretos nas proximidades do aço, ela pode não ter relação com a realidade. Em virtude de não se formarem células com concentrações diferentes ao longo da superfície da barra, as características iniciais da corrosão por *pite* podem ser alteradas (LI; YUAN; LI, 2011). O Quadro 3 apresenta um resumo das vantagens e das desvantagens do método.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da adição de cloretos à massa de concreto

Vantagens	Desvantagens
Praticidade na realização do ensaio	Alteração na formação da película passivadora
Velocidade do ensaio	Não formação de um perfil de cloretos (situação que acontece em condições reais)
Facilidade na aferição da concentração crítica de cloretos	Alteração da porosidade da matriz em função de diferentes tipos de ligação entre a matriz cimentícia e os cloretos
	Não envolve nenhum mecanismo de transporte de massa

Ciclos de imersão e secagem

Esse tipo de ensaio caracteriza-se por submeter os corpos de prova a períodos de imersão, parcial ou total (Figuras 3a e 3b), em solução agressiva e posterior secagem em ambiente de laboratório, câmara climática ou estufa (Figura 3c). As principais variáveis que influenciam na resposta desse tipo de ensaio são tempo de exposição aos ciclos, concentração da solução, tipo de cátion associado aos íons cloretos, período para renovação da solução, tempo de imersão, tipo de imersão (total ou parcial), tempo de secagem, tipo de secagem (em ambientes de laboratório, câmara climática ou estufas) e condições de secagem (temperatura, umidade e ventilação).

Na literatura, a solução mais empregada é a de cloreto de sódio a 1 M, devido a sua proximidade com a concentração salina média dos mares, algo próximo a 3,5% em relação à massa de água (GLASS; BUENFELD, 1997; PAGE *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006). Quanto aos ciclos, os períodos de imersão/secagem mais empregados são os de 3 dias para imersão e de 4 dias para secagem ou de 2 dias para imersão e 5 dias para secagem (GJØRV; VENESLAND, 1979; CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST *et al.*, 2011a). Essas proporções com maior período de secagem têm relação com a maior facilidade do material em absorver água quando em imersão e com a maior dificuldade em perdê-la quando em secagem.

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.*, 2011b) e a secagem em estufa com temperatura variando entre 40 °C e 50 °C (VIEIRA, 2003; TAVARES; COSTA; ANDRADE, 2006; KISHIMOTO, 2010). A principal vantagem do uso da secagem em estufa é a aceleração do ingresso de cloretos no interior do concreto em função do posterior aumento da sucção capilar (TANG; NILSON, 1993). Por outro lado, o uso de uma temperatura elevada, acima de 50 °C, pode alterar a microestrutura do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008) e, portanto, deve ser evitada.

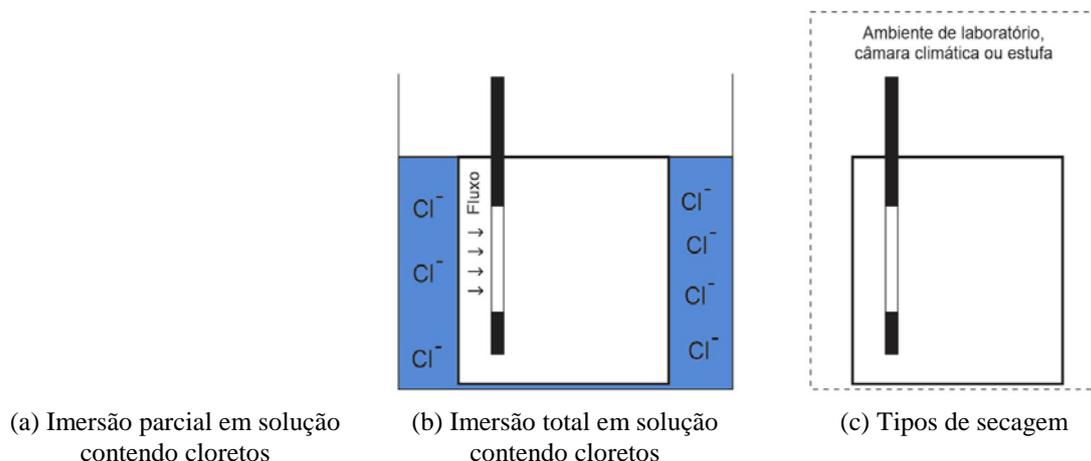
Nos ciclos de imersão e secagem, a sucção capilar, que se caracteriza pela penetração dos íons cloreto na rede porosa do material por tensões capilares, prevalece nas camadas superficiais do concreto (ANGST; VENNESLAND, 2009). No entanto, nas camadas mais profundas, onde a perda de água não é tão acentuada durante a secagem, também ocorre difusão (COSTA; APPLETON, 2007; MEIRA *et al.*, 2010). Por isso, esse método de ensaio apresenta significativa afinidade com a realidade (ANGST *et al.*, 2009).

O emprego de ciclos de imersão e secagem possibilita o monitoramento eletroquímico durante todo o período de ensaio, com respostas em relação ao comportamento eletroquímico da armadura ao longo desse período. Porém, durante o monitoramento, pode-se verificar curtos ciclos de passivação e repassivação até a consolidação do início do processo corrosivo, motivado pelas mudanças de ambiente em curto espaço de tempo (MEIRA *et al.*, 2014). Alterações microestruturais podem acontecer durante o ensaio não só motivadas pela idade, mas também relacionadas a pequenas curas do concreto durante as imersões, o que resulta em reduções de porosidade. Por outro lado, dependendo da temperatura que se empregue na secagem, pode haver alterações microestruturais que, em contrapartida, ensejem aumento de porosidade.

Diferentemente dos ensaios com adição de cloretos à massa de concreto, aqui o concreto apresenta concentrações de cloretos variando com a profundidade. Isso, se, por um lado, dificulta a obtenção dos teores críticos de cloretos, por outro, favorece à formação da película passivadora de forma semelhante às condições reais de exposição.

Comparando o presente método com outros métodos de ensaio, como a adição de cloretos à massa de concreto e a eletromigração, o ensaio por imersão e secagem apresenta um tempo relativamente elevado de ensaio para conduzir a armadura à despassivação, em virtude dos mecanismos de transporte envolvidos. O Quadro 4 resume as vantagens e as desvantagens de se empregar esse método de ensaio.

Figura 3 - Configuração dos procedimentos de imersão e secagem



Quadro 4 - Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de ciclos de imersão e secagem

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução à corrosão	Período relativamente longo para a realização do ensaio
Afinidade com a realidade	Secagem pode interferir na microestrutura da rede porosa
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte	Controle parcial das principais variáveis que envolvem o transporte de cloretos
Simplicidade de execução do ensaio	Possibilidade de curtos ciclos de passivação e repassivação até a consolidação do início do processo corrosivo

Eletromigração

A eletromigração envolve um conjunto de configurações de ensaios acelerados que se baseia na penetração de cloretos a partir da aplicação de um campo elétrico. Nesse tipo de ensaio, o mecanismo de transporte preponderante é a migração iônica (CASCUDO, 1997; MIETZ, 1998). Em um curto espaço de tempo, os íons cloreto migram, sob o efeito de um campo elétrico, no sentido da armadura, em vez de se difundirem lentamente no interior do concreto, devido a diferenças de concentração (TREJO; PILLAI, 2003). As configurações de ensaio são as mais diversas e variam desde os tipos de solução empregada, passando pelas formas de montagem do ensaio, até a intensidade do campo elétrico e seu tempo de aplicação. As configurações de ensaio mais utilizadas estão apresentadas nas Figuras 4a e 4b. Contudo, o ensaio apresentado na Figura 4c também pode ser identificado na literatura, com aplicação observada nos Estados Unidos.

No geral, o tipo de configuração mostrado na Figura 4a é a mais empregada (CABRERA, 1996; ALONSO *et al.*, 1998; PAGE *et al.*, 2002; AUSTIN; LYONS; ING, 2004; TORRES, 2006; SPAINHOUR; WOOTTON, 2008; AUSTIN; LYONS; ING, 2004). Porém, esse tipo de

configuração, apesar de ser o mais simples dos três, caracteriza-se por uma forte polarização na barra, tendo em vista que um dos polos é a própria armadura (TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009).

A Figura 4b mostra o esquema de montagem proposto por Castellote, Andrade e Alonso (2002), que consiste no emprego de uma diferença de potencial entre duas malhas metálicas imersas em soluções distintas, a primeira (na parte superior) contendo cloretos e a segunda (na parte inferior) contendo apenas água destilada. Por não empregar a barra como polo positivo, a polarização da armadura é reduzida. Porém, tal configuração de montagem repercute em um maior tempo de ensaio quando comparado à configuração mostrada na Figura 4a, devido à maior espessura do meio resistivo existente entre os polos.

Na Figura 4c, tem-se o ensaio *Accelerated Chloride Threshold Test (ACT)*, proposto por Trejo e Miller (2003), um ensaio complexo que consiste na confecção de corpos de prova de argamassa cilíndricos (Figura 4c-7) (75x150 mm) com armadura embutida. Acima dos CPs, são dispostos reservatórios (Figura 4c-2) contendo uma solução com 3,5% de cloreto de sódio (Figura 4c-3). A diferença de potencial aplicada por uma fonte de

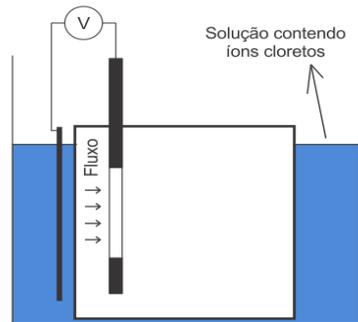
bancada entre o cátodo (Figura 4c-4) e o ânodo (Figura 4c-10) é de 20 V, logo a barra não é usada como polo para aplicação da tensão. A armadura é ligada a um “terra”, minimizando drasticamente o efeito da polarização. O campo elétrico é aplicado em intervalos de 6 h, e as medidas eletroquímicas são realizadas 42 h após o emprego do campo. A corrosão da armadura é monitorada constantemente através de potenciostato, usando a técnica de resistência à polarização. Embutidos no corpo de prova estão o contraeletrodo (Figura 4c-5) e a sonda de Haber-Luggin (Figura 4c-6), que contém um eletrodo de referência (eletrodo de calomelano saturado), de modo a executar os ensaios de resistência de polarização. O ensaio prossegue até a detecção da despassivação da armadura.

Na literatura, o sal mais empregado nos ensaios de eletromigração é o cloreto de sódio (CABRERA, 1996; CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2002; PAGE *et al.*, 2002; AUSTIN; LYONS; ING, 2004; SPAINHOUL; WOOTTON, 2008; PRABAKAR; MANOJARAN; NEELAMEGAM, 2009; TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009; AHMAD, 2009). Em relação às concentrações de

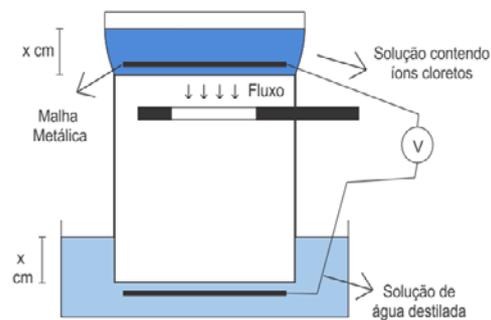
cloretos empregadas nas soluções, essas estão em torno de 1 M (ALONSO *et al.*, 1998; ANDRADE; ALONSO, 2002; LEE; NOGUCHIB; TOMOSAWAC, 2002; TREJO; MILLER, 2003; CASTELLOTE; TORRES, 2006; ABSORRA *et al.*, 2011).

A diferença de potencial recomendada varia de autor para autor, porém há uma tendência à aplicação de baixas diferenças de potencial. Trejo e Pillai (2003) recomendam 10 V, e Castellote, Andrade e Alonso (2002) recomendam valores entre 10 V e 13 V. O principal motivo para a aplicação de uma diferença de potencial mais baixa se deve principalmente a alterações na microestrutura do material e, conseqüentemente, nos perfis de cloretos, com o aumento da tensão aplicada (TREJO; PILLAI, 2003), bem como o efeito da polarização da armadura. Quanto maior a diferença de potencial aplicada no campo elétrico, maior a intensidade da polarização da armadura e maior será o tempo necessário para a barra voltar à configuração original (CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2002; TREJO; PILLAI, 2003).

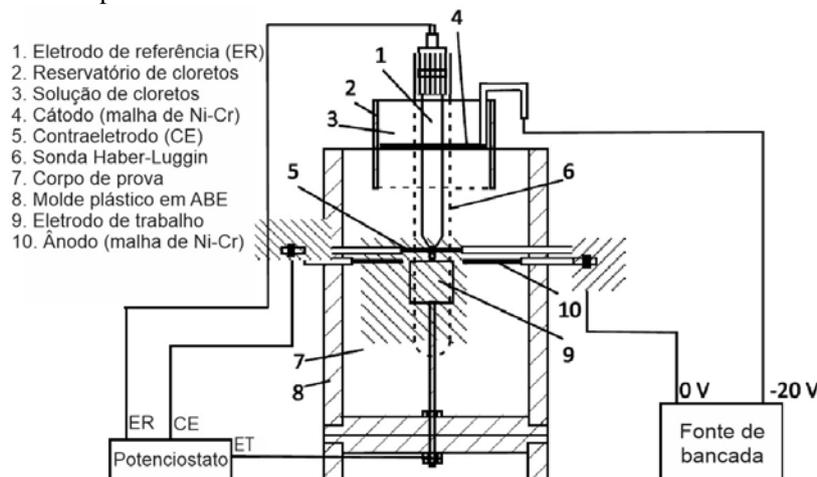
Figura 4 - Configurações de ensaio por migração iônica



(a) Método de indução usando a barra como um dos polos



(b) Método de indução usando malhas como polo



(c) Teste ACT (Accelerated Chloride Threshold Test)

Fonte: (a) Cabrera (1996); (b) Castellote, Andrade e Alonso (2002); e (c) Trejo e Miller (2003).

A aplicação de campo elétrico para acelerar o transporte de cloretos gera um efeito colateral, que é a migração de íons hidroxila (OH⁻). Assim, o pH da matriz cimentícia na região sofre alteração. Hausmann (1967) mostra que os valores-limite de cloretos para despassivação da armadura mudam proporcionalmente com a concentração de íons hidroxila (OH⁻) do ambiente. Logo, uma vez reduzida a concentração de OH⁻, também é reduzida a concentração de íons cloreto para provocar o início da corrosão. Castellote, Andrade e Alonso (2002) e Trejo e Pillai (2003) relataram que o pH do ambiente em volta da armadura diminui com o aumento do campo elétrico aplicado e/ou com o aumento do tempo de aplicação (carga passante), devido à oxidação de íons hidroxila no ânodo. Os mesmos autores também relatam que íons hidroxila são gerados no cátodo pela eletrólise das moléculas de água e posteriormente migram para o anodo, aumentando o pH do meio.

Além dos fatores citados acima, a baixa disponibilidade de oxigênio nas proximidades da armadura pode influenciar os resultados do monitoramento eletroquímico da armadura e do teor crítico de cloretos, já que, como os poros estão sempre saturados, poderá haver carência de oxigênio para ativação da armadura. Essa condição acaba fazendo com que mais cloretos penetrem no concreto antes da ativação da armadura e que ocorra uma superestimação do teor crítico de cloretos. O Quadro 5 resume as vantagens e as desvantagens de se empregar esse método de ensaio.

Ensaio da piscina ou “salt ponding test”

Os ensaios acelerados de indução da corrosão usando as configurações com reservatórios contendo soluções com cloretos na superfície de concretos são denominados de ensaios de piscina ou “salt ponding test”. O ensaio consiste na confecção de um reservatório (piscina) aderido à superfície do concreto, onde é adicionada uma solução contendo cloretos, e monitora-se a entrada de cloretos no

concreto. A diferença de concentração entre a solução da piscina e o interior do concreto gera um gradiente de concentração de cloretos que tem como consequência o transporte desses íons por difusão (CASCUDO, 1997).

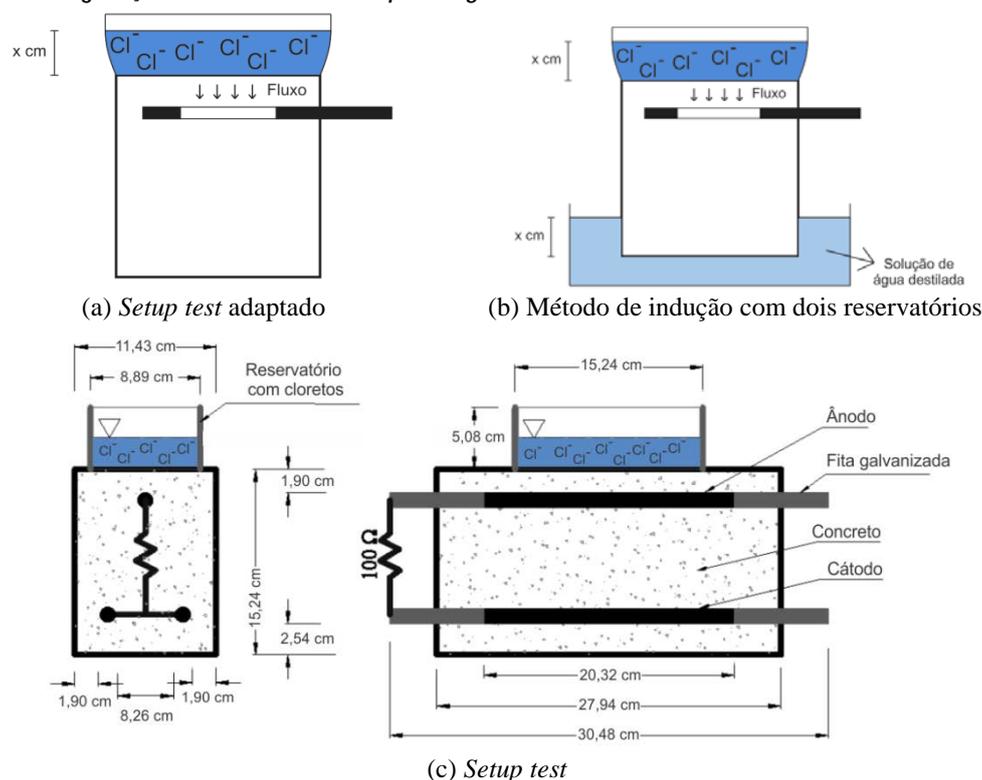
Alguns autores defendem que uma parte do transporte ocorre por absorção capilar, motivada pela diferença de umidade entre a face saturada, em contato com a piscina, e a face oposta. Essa diferença de umidade gera vapor de água e consequentemente um gradiente de pressão, que, por sua vez, induz a uma maior penetração de solução (STANISH; THOMAS, 2003). Para minimizar esse tipo de efeito, há a possibilidade de se manter o conjunto em ambiente com elevada umidade relativa ($\geq 95\%$) para mitigar a perda de umidade do corpo de prova para o ambiente.

Esse ensaio pode assumir distintas configurações (Figuras 5a, 5b e 5c), e suas principais variáveis são a altura x da solução (Figuras 5a e 5b), a concentração da solução de cloretos e o tempo de exposição à solução. Alguns trabalhos empregam ciclos de exposição ao reservatório contendo cloretos e secagem; deste modo há sobreposição de mecanismos de transporte (absorção capilar e difusão), o que descaracteriza a prevalência da difusão como mecanismo de transporte (AMERICAN SOCIETY..., 2007; OTIENO; ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2008).

Percebe-se o uso de corpos de prova prismáticos e cilíndricos nos ensaios, com preferência para o primeiro tipo. Porém, não há uma padronização nas dimensões. Em todos os casos analisados o sal empregado foi o cloreto de sódio; já a concentração da solução variou entre 3% e 5% (TREJO; MILLER, 2003; JOUKOSKI *et al.*, 2004; OTIENO; ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2008; TREJO; MILLER, 2003; JOUKOSKI *et al.*, 2004), com certa prevalência de 5%, fato esse explicado pela redução do tempo de ensaio.

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de eletromigração

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão	Pouca afinidade com a realidade
Curto tempo de ensaio	Pode ter uma configuração complexa
Possibilidade de estudo do transporte de massa	Polarização da barra
	Possível diminuição do pH na região da armadura, devido à aplicação do campo elétrico
	Limitação na oferta de oxigênio, devido ao fato de os poros estarem sempre saturados

Figura 5 - Configurações de ensaio de *salt ponding test*

Fonte: (a) T259-80 (AMERICAN ASSOCIATION..., 2002); (b) Joukoski *et al.* (2004); e (c) ASTM G109 - modificada (AMERICAN SOCIETY..., 2007).

Os ensaios que empregam esse tipo de configuração caracterizam-se pelo elevado tempo de ensaio até a despassivação da armadura. O elevado tempo de ensaio se deve, principalmente, ao mecanismo de transporte de massa e à carência de oxigênio nos poros, uma vez que os poros, em geral, estão saturados (ANGST *et al.*, 2009).

A Figura 5a mostra uma configuração de ensaio semelhante à da norma T259-80 (AMERICAN ASSOCIATION..., 2002). Nele o ensaio consiste no emprego de corpos de prova de concreto armado submetidos ao fluxo unidirecional de cloretos a partir de um reservatório fixado em sua parte superior. A disposição do conjunto em um ambiente com umidade controlada ($HR \geq 95\%$) contribui para que seja minimizada a secagem superficial dos corpos de prova. As alturas do reservatório e as concentrações da solução variaram de trabalho para trabalho. Chiang e Yang (2007) usaram uma solução de 3% de NaCl com altura da solução de 13 mm, e Otieno, Alexander e Beushausen (2008) usaram uma solução de 5% de NaCl com altura da solução de 25 mm. No entanto, não se espera que a altura do reservatório seja um fator de grande interferência em comparação com a concentração da solução.

Na Figura 5b tem-se a configuração de ensaio proposta por Joukoski *et al.* (2004). O ensaio consiste na confecção de dois reservatórios, um contendo água destilada e outro contendo uma solução com íons cloreto. O uso do reservatório contendo água destilada aumenta o gradiente de concentração e minimiza os efeitos de vaporização de água no interior do concreto, conforme citado no início desta seção. Essa configuração de ensaio, atrelada a uma pré-saturação dos poros com água destilada, antes do ensaio acelerado, contribui para que ocorra a prevalência do transporte por difusão. Em situações em que a troca de umidade com o meio possa assumir maior proporção, tem-se a possibilidade de manutenção dos corpos de prova em ambiente com umidade relativa elevada ($UR > 95\%$).

Por fim, a Figura 5c mostra a configuração de ensaio proposto pela norma G-109 (AMERICAN SOCIETY..., 2007). O ensaio consiste no emprego de corpos de prova de concreto com dimensões predeterminadas, submetidos a ciclos de exposição à solução com íons cloreto (3% de NaCl) contida num reservatório, durante 2 semanas, e secagem em ambiente de laboratório, também durante 2 semanas. Aos corpos de prova são adicionadas três barras de aço conectadas a um resistor de 100Ω . O monitoramento eletroquímico é feito sempre após a

exposição à solução agressiva, através das medidas de corrente (obtidas indiretamente por meio das medidas de potencial através do resistor), bem como através das medidas de potencial de corrosão, seguindo as recomendações das normas ASTM G-109 (AMERICAN SOCIETY..., 2007) e C-876 (AMERICAN SOCIETY..., 2015) respectivamente. O processo de exposição e secagem se repete até a detecção da corrosão. Esse tipo de ensaio é amplamente utilizado em estudos para avaliar vários métodos de proteção contra corrosão, incluindo diferentes propriedades do concreto, materiais com baixa taxa de aglomeração em substituição parcial ao uso de cimento, inibidores de corrosão e aços para estruturas de concreto resistentes à corrosão (TREJO; HALMEN; REINSCHMIDT, 2009).

A principal desvantagem do método de ensaio da piscina é o tempo para a finalização do ensaio. Esse fato é explicado por dois motivos: a limitação de oxigênio nas proximidades da armadura em função de os poros estarem saturados de solução; e o

mecanismo de transporte por difusão iônica conferir velocidade lenta de ingresso de cloretos. O Quadro 6 resume as vantagens e as desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

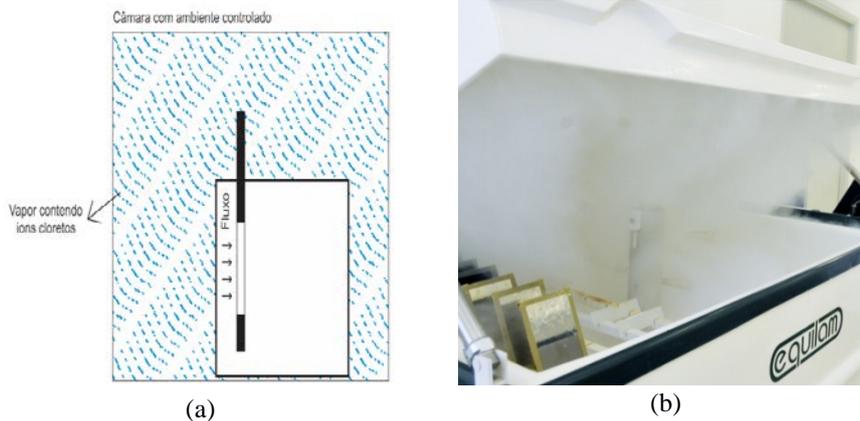
Câmara de névoa salina

O ensaio acelerado de indução da corrosão em câmara de névoa salina caracteriza-se por representar um típico ambiente de atmosfera marinha, onde a estrutura de concreto armado sofre a incidência de uma névoa contendo íons cloreto (Figura 6a). O ensaio consiste na colocação de corpos de prova em câmaras pré-fabricadas (Figura 6b) com ambiente controlado (temperatura, pressão, ciclos de aspersão, etc.), onde os CPs são aspergidos com solução salina vaporizada. Os principais mecanismos de transporte envolvidos são a absorção/capilar e a difusão, o primeiro, quando os corpos de prova ainda apresentam secagem superficial, e o segundo, quando seus poros vão sendo preenchidos pela solução aspergida.

Quadro 6 - Vantagens e desvantagens na aplicação do ensaio de salt ponding test

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução à corrosão	Tempo de ensaio
Afinidade com a realidade	Pode ter uma configuração complexa
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte	Limitação de oxigênio, devido ao fato de os poros estarem saturados

Figura 6 - Arranjo esquemático do ensaio em câmara de névoa salina (a); e imagem da câmara de névoa salina (b)



Existem normas que disciplinam o emprego da câmara de névoa salina para testar a resistência à corrosão de superfícies metálicas, como a B-117 (AMERICAN SOCIETY..., 1995), a ISO 9227 (INTERNATIONAL..., 2012) e a NBR 8094 (ASSOCIAÇÃO..., 1993). Alguns autores, no entanto, empregam essas normas para balizar estudos em concreto armado. Castro, Véleva e Balancán (1997) utilizaram as recomendações da norma ISO 9227 (INTERNATIONAL..., 2012). Portella *et al.* (2006) e Monteiro (2002) utilizaram as recomendações da norma B-117 (AMERICAN SOCIETY..., 1995). Santos (2010) usou as recomendações da norma brasileira NBR 8094 (ASSOCIAÇÃO..., 1993).

As principais variáveis que interferem no ensaio em câmara de névoa salina são o tipo de sal empregado, a concentração da solução vaporizada, a temperatura, a pressão, o volume de solução aspergida e o tempo entre cada aspersão. Em virtude das várias variáveis a serem controladas, a configuração do teste pode apresentar certo grau de complexidade (ANGST *et al.*, 2009).

O sal empregado em todos os trabalhos analisados foi o cloreto de sódio (CASTRO; VÉLEVA; BALANCÁN, 1997; CASTRO; RINCON; PAZINI, 2001; LEVY, 2001; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006; SANTOS, 2010). A concentração mais usada foi a de 5% (CASTRO; VÉLEVA; BALANCÁN, 1997; LEVY, 2001; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006). A temperatura apresentou-se bastante homogênea entre os trabalhos, algo em torno de 35 °C, com pequena variação (CASTRO; VÉLEVA; BALANCÁN, 1997; MONTEIRO, 2002; PORTELLA *et al.*, 2006; SANTOS, 2010).

Considerando os mecanismos de transporte envolvidos – primeiro a absorção/sucção capilar e, posteriormente, a difusão –, o tempo para início da corrosão pode ser bastante longo se comparado aos ensaios de eletromigração, mesmo tendo em vista as condições de controle da câmara. Por outro lado, nesse tipo de ensaio, pode-se avaliar o comportamento eletroquímico durante todo o período de ensaio e também estudar o transporte de cloretos durante esse mesmo período.

O Quadro 7 resume as vantagens e as desvantagens de se empregar esse tipo de método de ensaio.

Avaliação geral dos ensaios realizados

Com o intuito de ajudar na avaliação geral dos métodos de ensaio apresentados na seção anterior, foi confeccionado o Quadro 8. Nesse quadro, são analisadas, de forma conjunta, as principais características que influenciam na escolha do tipo de ensaio acelerado empregado na indução da corrosão por cloretos em corpos de prova de concreto armado. Para cada uma dessas características, é feita uma valoração de sua relação com cada tipo de ensaio, através de uma simbologia específica apresentada no mesmo quadro. Essa simbologia, apesar de representar uma avaliação qualitativa, se baseia em uma escala crescente de valoração da relação entre a característica analisada e o procedimento de ensaio, guardando também a referência de uma análise comparativa entre os procedimentos analisados. Ou seja, quanto maior é a quantidade de estrelas, maior é o impacto daquele ensaio na característica específica analisada. Por exemplo, um procedimento de ensaio com uma estrela em sua relação com a característica “tempo de ensaio” significa que aquele procedimento resulta em um tempo de ensaio muito pequeno, enquanto, se essa relação for identificada por cinco estrelas, o procedimento gera um tempo de ensaio muito longo.

A partir do Quadro 8, observa-se que os ensaios que apresentam melhor conexão com situações reais de exposição são aqueles que demandam maior tempo de operação. Portanto, a escolha passa por conciliar a necessidade da rapidez de resposta com a sintonia com a realidade. Com relação à simplicidade de procedimento, salvo os ensaios de eletromigração, que envolvem a montagem de um sistema elétrico, os demais são relativamente simples de ser realizados. Em geral, os ensaios analisados não oferecem grandes dificuldades para a determinação da concentração de cloretos, com maior destaque para os ensaios ACM e SS. Na mesma linha, os ensaios que operam com o transporte de cloretos do exterior para o interior não oferecem dificuldades para avaliar as características de transporte de massa nos materiais estudados. Por fim, cabe destacar que a configuração dos ensaios ACM e EM, em especial deste último, traz a possibilidade da influência da alteração da microestrutura do material analisado no transporte de cloretos.

Quadro 7 - Vantagens e desvantagens do ensaio em câmara de névoa salina

Vantagens	Desvantagens
Monitoramento eletroquímico durante todo o processo de indução a corrosão	Longo tempo de ensaio demandado em CPs de concreto
Afinidade com a realidade	Pode ter uma configuração complexa
Possibilidade de estudo dos mecanismos de transporte	Em algumas situações pode pressurizar o meio, distanciando o ensaio da realidade

Quadro 8 - Características dos métodos de ensaio acelerado empregados na indução à corrosão por cloretos

Características analisadas	Tipo de ensaio acelerado ¹					
	ACM	I/S	EM	SPT	CNS	SS
Tempo de ensaio	★ ²	★★★	★★	★★★★	★★★	★
Simplicidade de procedimento	★★★★★	★★★	★	★★★	★★★	★★★★★
Afinidade com a realidade	★	★★★★★	★★★	★★★★	★★★★★	★
Facilidade de leituras de concentração de cloretos	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★
Possibilidade de monitoramento eletroquímico durante o ingresso de cloretos	N	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Alterações no concreto com a aplicação do ensaio	★★★★	★	★★★★★	★	★	N

Nota: ¹abreviações dos tipos de ensaio acelerado: adição de cloretos à massa (ACM); ciclos de imersão e secagem (I/S); eletromigração (EM); salt ponding test (SPT); câmara de névoa salina (CNS) e simulação em solução (SS). ²simbologia: ★★★★★ (muito alto); ★★★★ (alto); ★★★ (médio); ★★ (baixo); ★ (muito baixo); N (não se aplica).

Importância da padronização

Apesar da grande quantidade de estudos realizados, a diversidade de procedimentos empregados para indução da corrosão desencadeada por cloretos favorece à dispersão de resultados, com impacto sobre variáveis como o período de iniciação da corrosão e o teor crítico de cloretos. Um exemplo dessa dispersão pode ser observado em levantamentos sobre o teor crítico de cloretos na literatura, que apresentam valores que podem variar entre 0,15% e 2,95% (massa de cimento) para cloretos totais (ANGST *et al.*, 2009; MEIRA *et al.*, 2014). Contudo, a grande variabilidade dos resultados não se deve apenas às configurações de ensaio, mas também às técnicas de medição associadas aos parâmetros de leitura obtidos e aos critérios adotados para identificar a despasseivação da armadura, às diferenças de definições e à

natureza estocástica e complexa da iniciação da corrosão por pites.

No contexto das configurações de ensaio, os Quadros 1 e 2 apresentam o cenário de diversidade praticado. Um exemplo dessa diversidade refere-se à preparação das armaduras para os ensaios. Com relação à preparação da barra antes dos ensaios, os estudos abordados neste trabalho empregam as armaduras basicamente de três maneiras: como recebidas na obra (CASTRO; VÉLEVA; BALANCÁN, 1997; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007), com decapagem mecânica (escovação ou jateamento da superfície) (OTIENO; ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2008; SILVA, 2010) ou com decapagem química (MAADDAWY; SOUDK, 2003; MEDEIROS *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2018). Tais estudos demonstram que as condições superficiais da barra têm efeito significativo no comportamento eletroquímico dela e no teor crítico

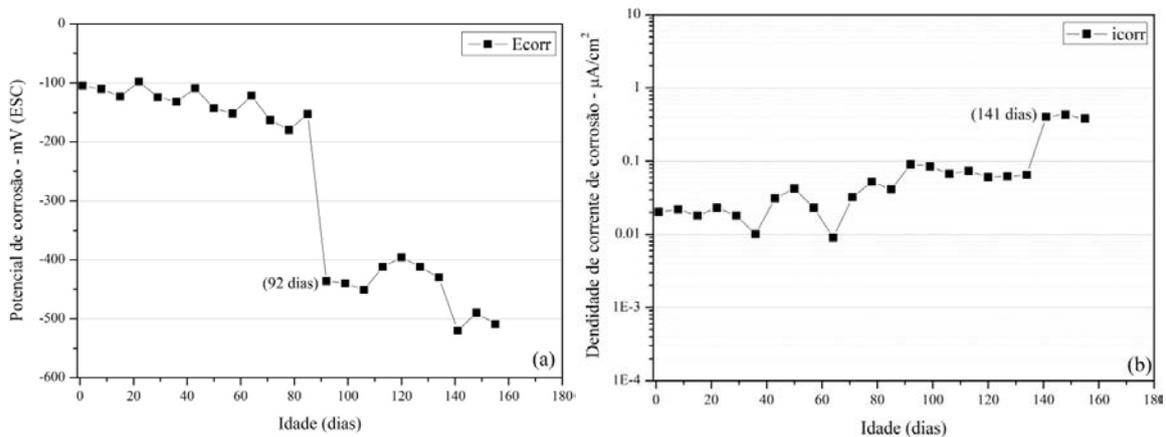
de cloretos, em virtude de diferenças na formação da capa passiva (GONZALEZ *et al.*, 1996; CASCUDO, 1997; FERREIRA, 2015;). Em geral, o tratamento superficial da barra aumenta o teor crítico de cloretos e, por consequência, o tempo de serviço da estrutura, respeitando a seguinte ordem de crescimento: armadura como recebido na obra < com limpeza mecânica < com decapagem química (ANGST *et al.*, 2009; FERREIRA, 2015).

No que se refere aos parâmetros de leitura e aos critérios adotados para identificar a despassivação da armadura, pode-se exemplificar a situação em que apenas o potencial de corrosão é empregado para identificar a despassivação da armadura, tendo o referencial limite de valores mais eletronegativos que -350 mV (ESC) (AMERICAN SOCIETY..., 2015) ou quando se emprega o potencial de corrosão com o mesmo referencial anterior, somado a uma densidade de corrente de corrosão superior a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (CIGNA *et al.*, 1997), associados à observância de um “salto” nas medidas dessas duas variáveis. Através da Figura 7, que representa o comportamento de um mesmo material/corpo de prova, pode-se observar que, dependendo da metodologia adotada, a configuração da despassivação pode se dar em momentos distintos, com impactos nas observações dela decorrentes, como, por exemplo, o período de iniciação da corrosão e o teor crítico de cloretos. Ao tomar como referência a despassivação apenas com base nas

medidas de potencial de corrosão, a Figura 7a indica que esse momento ocorre aos 92 dias, quando o referencial crítico de -350 mV (ESC) é ultrapassado. No entanto, se essa variável for tomada de modo conjunto com a densidade de corrente de corrosão, a despassivação só se confirma aos 141 dias, quando as medidas de corrente ultrapassam o limite de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e quando também se observam “saltos” nas medidas de E_{corr} e i_{corr} , esta última com um aumento de aproximadamente 6 vezes nos seus valores.

No que se refere a diferenças de definições, pode-se citar o caso do teor crítico de cloretos. Quando se associa o teor crítico à concentração de cloretos necessária para despassivar a armadura, tem-se um referencial mais conservador, com teores críticos mais baixos (THOMAS, 1996; GLASS; BUENFELD, 1997; CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2002; TREJO; MILLER, 2003; ANGST *et al.*, 2011a; MEIRA *et al.*, 2014). No entanto, quando se associa o teor crítico à concentração de cloretos obtida no momento em que há uma visível deterioração da estrutura (dentro de limites aceitáveis), como é o caso do aparecimento das primeiras microfissuras de corrosão na estrutura, tem-se um referencial menos conservador e, portanto, concentrações críticas com valores mais altos (RICHARTZ, 1969¹ *apud* ANGST *et al.*, 2009).

Figura 7 - Exemplo de como diferentes técnicas/critérios de medição podem influenciar no resultado desejado - critério do potencial de corrosão (a), critério da densidade de corrente de corrosão (b)



Fonte: adaptado de Meira (2004).

¹RICHARTZ, W. Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. Zement-Kalk-Gips, v. 10, p. 447-456, 1969.

No que se refere à natureza estocástica da corrosão por pites, há de se destacar que é importante a necessidade de realizar um número mínimo de repetições que permita representar o fenômeno com um nível mínimo de confiança. No caso específico do emprego dos ensaios de indução da corrosão para estudo do teor crítico de cloretos, estudos prévios indicam a necessidade de seis repetições para um nível de confiança de 95% (MEIRA *et al.*, 2014).

No cenário internacional, algumas propostas de ensaio têm sido colocadas, embora ainda não se tenha uma padronização ampla (TREJO; PILAI, 2003; ANGST *et al.*, 2009). No cenário brasileiro, a carência de padronização é uma realidade, o que demanda esforços para que se possa caminhar no sentido de uniformizar procedimentos aplicados na indução da corrosão por cloretos. A padronização dos ensaios é um caminho que não só auxiliaria o pesquisador com dados mais confiáveis, mas facilitaria sua comparação com outras fontes, dando melhor suporte à tomada de decisões.

Considerações finais

A indução da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado tem sido estudada através de diversos arranjos experimentais, com configurações significativamente diferentes. Ao analisar os resultados relatados na literatura, percebe-se que certos parâmetros inerentes ao procedimento de ensaio, tais como a aplicação de um campo elétrico para acelerar a penetração de cloretos ou a falta de limpeza da armadura, por exemplo, podem influenciar diretamente nos resultados e, conseqüentemente, nas conclusões daí advindas. Sendo assim, pode-se dizer que algumas configurações experimentais não são adequadas para se obterem resultados que tenham maior proximidade com condições reais de exposição.

Conforme apresentado neste trabalho, o estado da arte das pesquisas sobre ensaios acelerados no Brasil e no mundo mostra que, apesar do enorme enfoque dado ao assunto, ainda não há uma padronização nos parâmetros e procedimentos de ensaio, especialmente no Brasil. Entende-se que essa padronização deve passar por uma maior proximidade com a realidade. Nesse sentido, recomendam-se os seguintes pontos:

- (a) a preferência por ensaios com mais afinidade com a realidade, como os ciclos de imersão e secagem, o *salt ponding test* e a câmara de névoa salina, já que eles são governados por fenômenos físicos próximos da realidade;
- (b) deve-se preferir o uso de corpos de prova prismáticos com cobrimentos padronizados pela normalização em vigor, tendo em vista a maior

facilidade de representar um fluxo unidirecional dos íons agressivos e condições mais reais da camada de cobrimento;

(c) é melhor empregar armaduras usadas tradicionalmente em obras de construção civil e limpas por decapagem química. Mesmo não sendo essa condição a que ocorre nas obras, além de ser a condição mais empregada na literatura, ela facilita a estabilização das medidas eletroquímicas e, por conseguinte, a identificação do teor crítico de cloretos. Além do mais, gera resultados a favor da segurança;

(d) deve-se seguir a tendência de uso já bastante empregada pela literatura de solução agressiva de cloreto de sódio a um molar, uso de adensamento mecânico nos corpos de provas e a delimitação de uma área central de exposição da armadura;

(e) recomenda-se adotar o critério de despassivação da armadura pautado na indicação simultânea do potencial de corrosão mais eletronegativo que -350 mV (ESC) (AMERICAN SOCIETY..., 2015) e da densidade de corrente de corrosão maior que 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (CIGNA *et al.*, 1997), com “salto” em suas medidas, detectado através do monitoramento eletroquímico; e

(f) o uso de ferramentas estatísticas para minimizar incertezas oriundas da complexidade do processo estocástico que é a corrosão é o mais indicado.

Referências

- ABOSRRA, L.; ASHOUR, A. F.; YOUSEFFI, M. Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete of Different Compressive Strengths. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3915-3925, 2011.
- AHMAD, S. Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 34, n. 2C, p. 95-104, 2009.
- ALONSO, C. *et al.* Factors Controlling Cracking of Concrete Affected by Reinforcement Corrosion. **Materials and Structures**, v. 31, p. 435-441, aug./sep. 1998.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATES HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T259-80**: standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, DC, 2002.

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATES HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T-277**: electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, DC, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **B-117**: standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. Philadelphia, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia, 2018a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-876**: standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-1573**: standard test method for measurement and reporting of masking sound levels using a-weighted and one-third-octave-band sound pressure levels. Philadelphia, 2018b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G-109**: standard test method for determining effects of chemical admixtures on corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments. Philadelphia, 2007.
- ANDRADE, C. Procesos de Corrosión en el Hormigón y Métodos Modernos de Cálculo de la Carbonatación, Penetración de Cloruros y Propagación de la Corrosión. In: CURSO DE ESTUDIOS MAYORES DE LA CORROSIÓN, 15., 2001, Madrid. **Actas...** Madrid: IETcc, 2001.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; MOLINA, F. J. Cover Cracking as a Function of Bar Corrosion: part I: experimental test. **Materials and Structures**, v. 26, n. 8, p. 453-464, oct. 1993.
- ANGST, U. M. *et al.* Chloride Induced Reinforcement Corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**, v. 53, p. 1451-1464, jan. 2011a.
- ANGST, U. M. *et al.* Chloride Induced Reinforcement Corrosion: rate limiting step of early pitting corrosion. **Electrochimica Acta**, v. 56, p. 5877-5388, may 2011b.
- ANGST, U. M. *et al.* Critical Chloride Content in Reinforced Concrete: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1122-1138, aug. 2009.
- ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. Critical Chloride Content in Reinforced Concrete: state of the art. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, p. 311-317, 2009.
- ANN, K. Y. *et al.* The Resistance of High Alumina Cement Against Corrosion of Steel in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1502-1510, feb. 2010.
- ARYA, C.; XU, Y. Effect of Cement Type on Chloride Binding and Corrosion of Steel in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 893-902, nov. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8094**: material metálico revestido e não revestido: corrosão por exposição à névoa salina: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993.
- AUSTIN, S. A.; LYONS, R.; ING, M. Electrochemical Behaviour of Steel Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing. **Corrosion**, v. 60, n. 2, p. 203-212, 2004.
- BÄUMEL, A. Die Auswirkung von Betonzusatzmitteln auf das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton. **Zement-Kalk-Gips**, v. 7, p. 294-305, 1959.
- BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; PEDEFERRI, P. Corrosion Behaviour of Steel in Concrete in the Presence of Stray Current. **Corrosion Science**, v. 49, p. 1056-1068, aug. 2007.
- 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.
- CABRERA, J. G. Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 47-59, 1996.
- CASCUDO, O. **Contribuição ao Estudo e Emprego de Técnicas Eletroquímicas no Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto Armado**. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini, 1997.

- CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Accelerated Simultaneous Determination of the Chloride Depassivation Threshold and of the Non-Stationary Diffusion Coefficient Values. **Corrosion Science**, v. 44, p. 2409-2424, Feb. 2002.
- CASTRO, P.; RINCON, O. T. de; PAZINI, E. J. Interpretation of Chloride Profiles From Concrete Exposed to Tropical Marine Environments. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 529-537, jan. 2001.
- CASTRO, P.; VÉLEVA, L.; BALANCÁN, M. Corrosion of Reinforced Concrete in Tropical Marine Environment and Accelerated Test. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 2, p. 75-81, mar. 1997.
- CAVALCANTI FILHO, A. N. Contribuição ao Controle Tecnológico de Concretos Estruturais de Cimento Portland em Ambientes Marítimos. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CHIANG, C. T.; YANG, C. C. Relation Between the Diffusion Characteristic of Concrete From Salt Ponding Test and Accelerated Chloride Migration test. **Materials Chemistry and Physics**, v. 106, p. 240-246, 2007.
- CIGNA, R. *et al.* **Corrosion and Protection of Metals in Contact With Concrete**. COST Action 509 – Final Report. European Community: 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.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12390-11**: testing hardened concrete: part 11: determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. Brussels, 2015.
- FERREIRA, P. R. R. **Análise da Indução da Corrosão Por Cloretos em Concretos Armados Com Adição de Resíduo de Tijolo Moído a Partir de Ensaios Acelerados**. Recife, 2015. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos Para Proteção da Armadura Contra a corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas**: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado. São Paulo, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- GARCÉS, P.; SANCHEZ DE ROJAS, M. J.; CLIMENT, M. A. Effect of the Reinforcement Bar Arrangement on the Efficiency of Electrochemical Chloride Removal Technique Applied to Reinforced Concrete Structures. **Corrosion Science**, v. 48, p. 531-545, jan. 2006.
- GARCIA-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, jun. 2007.
- GJØRV, O. E.; VENNESLAND, O. Diffusion of Chloride Ions From Seawater Into Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 9, p. 229-238, jan. 1979.
- GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The Presentation of the Chloride Threshold Level For Corrosion of Steel in Concrete. **Corrosion Science**, v. 39, n. 5, p. 1001-1013, 1997.
- 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.
- GONZÁLEZ, A. *et al.* Behaviour of Pre-Rusted Steel in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 501-511, 1996.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado em Ambientes Marítimos**. São Paulo, 2000. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- GULIKERS, J. Considerations on the Reliability of Service Life Predictions Using a Probabilistic Approach. **Journal de Physique IV**, v. 136, p. 233-241, 2006.
- GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry Deposition and Concentration of Marine Aerosols in a Coastal Area, sw Sweden. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 6, p. 977-989, 1996.
- HAUSMANN, D. A. Steel Corrosion in Concrete: how does it occur? **Materials Protection**, v. 6, n. 11, p. 19-23, 1967.

- HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras Para Concreto Armado**. São Paulo: IPT; Pini, 1986.
- HUANG, R.; YANG, C. C. Condition Assessment of Reinforced Concrete Beams Relative to Reinforcement Corrosion. **Cement and Concrete Composites**, v. 19 p. 131-137, nov. 1997.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9227**: corrosion tests in artificial atmospheres: salt spray tests. Switzerland, 2012. Annual Book of International Standards.
- JAEGERMANN, C. Effect of Water-Cement Ratio and Curing on Chloride Penetration Into Concrete Exposed to Mediterranean Sea Climate. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 4, p. 333-339, 1990.
- JOUKOSKI, A. *et al.* The Influence of Cement Type and Admixture on Life Span of Reinforced Concrete Utility Poles Subjected to the High Salinity Environment of Northeastern Brazil, Studied by Corrosion Potential Testing. **Cerâmica**, v. 50 p. 12-20, 2004.
- JUCÁ, T. R. P. *et al.* Influência das Adições Minerais na Corrosão de Armaduras Induzida por Cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais... foz do Iguaçu**, 2001.
- KAESCHE, H. Die Prüfung der Korrosionsgefährdung von Stahlarmierungen durch Betonzusatzmittel. **Zement-Kalk-Gips**, v. 7, p. 289-294, 1959.
- 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.
- LEE, H.-S.; NOGUCHI, T.; TOMOSAWAC, F. Evaluation of the Bond Properties Between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1313-1318, 2002.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos Com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LI, F.; YUAN, Y.; LI, C.-Q. Corrosion Propagation of Prestressing Steel Strands in Concrete Subject to Chloride Attack. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3878-3885, may 2011.
- LIMA, M. G. **Influência dos Componentes do Concreto na Corrosão de Armaduras**. Porto Alegre, 1990. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.
- LIU, W. *et al.* Discussion and Experiments on the Limits of Chloride, Sulphate and Shell Content in Marine Fine Aggregates For Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, n. 20, p. 725-733, jan. 2018.
- MAADDAWY, T. A. El; SOUDK, K. A. Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 1, jan./feb. 2003.
- MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Estudo da Resistividade do Concreto Para Proposta de Modelagem de Vida Útil**: corrosão de armaduras devido a penetração por cloretos. São José dos Campos, 2014. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Com Proteção Superficial Frente a Ação Por Cloretos**. São Paulo, 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Potencial de Corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **Revista IBRACON de Estrutura e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864-885, jul. 2017.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MEIRA, G. R. **Agressividade Por Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha Frente ao Problema da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Florianópolis, 2004. 369 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- 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.
- 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.

- MIETZ, J. **Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures**: a state of the art report. European Federation of Corrosion. London: The Institute of Materials, 1998.
- MIRANDA, L. R. M. *et al.* Avaliação da Resistência à Compressão e do Desempenho Frente à Corrosão Por Cloretos de Um Concreto Auto-Adensável Produzido Com Adição de Biopolímero. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS, 17., Recife, 2017. **Anais...** Recife: CONPAR, 2017.
- MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de Cloretos Para Reabilitação de Estruturas de Concreto Com Problemas de Corrosão de Armaduras**. São Paulo, 2002. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- MONTEIRO, P. J. M.; GJØRV, O. E.; MEHTA, P. K. Microstructure of the Steel-Cement Paste Interface in the Presence of Chloride. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 781-784, mar. 1985.
- MORCILLO, M. *et al.* Effect of Marine Aerosol on Atmospheric Corrosion. **Materials Performance**, v. 38, p. 72-77, 1999.
- NORDTEST METHOD. **NT BUILD 443**: accelerated chloride penetration. Finland, 1995. Annual Book of NT BUILD Standards.
- NORDTEST METHOD. **NT BUILD 492**: concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, 1999.
- OTIENO, M. B.; ALEXANDER, M. G.; BEUSHAUSEN, H. D. Corrosion Propagation in Cracked and Uncracked Concrete. In: **CONCRETE REPAIR, REHABILITATION AND RETROFITTING II**, 2., Cape Town, 2008. **Proceedings...** London: ICCRRR-2, 2008.
- PAGE, C. L.; HAVDAHL, J. Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in Microsilica Cement Pastes. **Materials and Structures**, v. 18, p. 41-47, 1985.
- PAGE, M. M. *et al.* Ion Chromatographic Analysis of Corrosion Inhibitors in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 73-81, jan. 2002.
- PORTELLA, K. F. *et al.* Desempenho Físico-Químico de Metais e Estruturas de Concreto de Redes de Distribuição de Energia: estudo de caso na região de Manaus. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 724-734, abr. 2006.
- PRABAKAR, J.; MANOHARAN, P. D.; NEELAMEGAM, M. Performance Evaluation of Concrete Containing Sodium Nitrate Inhibitor. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES**, 11., Bath, 2009. **Proceedings...** Bath: Nocmat, 2009.
- RAUPACH, M. Chloride-Induced Macrocell Corrosion on Steel in Concrete: theoretical background and practical consequences. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 329-338, feb. 1995.
- RINCON, O. T. *et al.* Environmental Influence on Point Anodes Performance in Reinforced Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 494-503, jan. 2008.
- RIVERA-CORRAL, J. O. *et al.* Corrosion Behavior of Steel Reinforcement Bars Embedded in Concrete Exposed to Chlorides: effect of surface finish. **Construction and Building Materials**, v. 147, n. 30, p. 815-826, aug. 2017.
- SAETTA, A. V.; SCOTTA, R. V.; VITALIANI, V. Analysis of Chloride Diffusion Into Partially Saturated Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 90, n. 5, p. 441-451, 1993.
- SANTOS, F. C. M. **Estudo da Polianilina e da Polianilina-Melamina Como Revestimento Anticorrosivo Para Armaduras do Concreto Armado**. Curitiba, 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- 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, 161 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- SILVA, C. A. **Comportamento dos Perfis de Cloreto em Tetrápodes Localizados nos Molhes da Barra Rio Grande – RS – Brasil**. Rio Grande, 2010. 287 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.
- 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 Politécnica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

- SPAINHOUR, L. K.; WOOTTON, I. A. Corrosion Process and Abatement in Reinforced Concrete Wrapped by Fibber Reinforced Polymer. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 535-543, mar. 2008.
- STANISH, K.; THOMAS, M. D. A. The Use of Bulk Diffusion Tests to Establish Time Dependent Concrete Chloride Diffusion Coefficients. **Cement and Concrete Research**, v. 33 n. 1, p. 55-62, 2003.
- TANG, L.; NILSSON, L.-O. Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 247-253, 1993.
- 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.
- THANGAVEL, K.; RENGASWANY, N. S. Relationship Between Chloride/Hydroxide Ratio and Corrosion Rate of Steel in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 283-292, 1998.
- THOMAS, M. Chloride Thresholds in Marine Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 513-519, 1996.
- TORRES, A. S. **Avaliação da Sensibilidade do Ensaio CAIM: corrosão acelerada por imersão modificada: frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado.** Porto Alegre, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- TORRES, A. S. **Corrosão Por Cloretos em Estruturas de Concreto Armado: uma meta-análise.** Porto Alegre, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- TREJO, D.; HALMEN, C.; REINSCHMIDT, K. **Corrosion Performance Tests for Reinforcing Steel in Concrete:** technical report. Austin: Texas Transportation Institute, 2009. (Technical Report Documentation Page, FHWA/TX-09/0-4825-1). Disponível em: <<https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/16937>>. Acessado em: 23 mar. 2017.
- TREJO, D.; MILLER, D. **System and Method For Determining the Chloride Corrosion Threshold Level for Uncoated Steel Reinforcement Embedded in Cementitious Material.** US Patent Application Serial No. 60/288, p. 210, 2003.
- TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: part I - ASTM A615 and A706 reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 6, p. 519-527, 2003.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Sweden: CBI, 1982.
- 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) – Escola de Engenharia, 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.
- WHEAT, H. G. Using Polymers to Minimize Corrosion of Steel in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 119-126, 2002.
- YOON, S. *et al.* Interaction Between Loading, Corrosion and Serviceability of Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 7, p. 72-85, 2000.

Gibson Rocha Meira

Departamento de Construção Civil, Ciência e Tecnologia da Paraíba | Instituto Federal de Educação | Av. 1º de maio, 720, Jaguaribe | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58015-430 | Tel.: (83) 3612-0830 | E-mail: gibsonmeira@yahoo.com

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

Coordenação de Obras de Engenharia | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba | Tel.: (83) 3208-3000 | E-mail: pablo.r06@hotmail.com

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

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.