

SUBMETIDO 10/03/2024

APROVADO 16/05/2024

PUBLICADO ON-LINE 05/06/2024

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 21/08/2025

EDITOR ASSOCIADO

Prof. Dr. Hugo Plínio de Andrade Alves

 Mariane Rodrigues
de Carvalho ^[1]

 Pablo Ramon
Rodrigues Ferreira ^[2] *

 Gibson Rocha Meira ^[3]

[1] marianekrvalho@hotmail.com
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental
(PPGECAM), Universidade Federal
da Paraíba (UFPB), João Pessoa,
Paraíba, Brasil

[2] pablo.r06@hotmail.com

[3] gibsonmeira@yahoo.com
Instituto Federal da Paraíba (IFPB),
João Pessoa, Paraíba, Brasil

* Autor para correspondência.

Comportamento de concretos moldados com armadura galvanizada frente à corrosão por cloretos

RESUMO: As estruturas de concreto armado frequentemente sofrem corrosão das armaduras em ambientes de agressividade marinha, uma patologia recorrente e onerosa para a indústria da construção. Mitigar essa situação pode resultar em soluções estruturais mais duráveis e econômicas em longo prazo. Este artigo analisa o comportamento de estruturas de concreto armado moldadas com aço galvanizado em relação à corrosão por cloretos, o principal agente agressivo em regiões próximas ao mar. Foram moldados corpos de prova com diferentes tipos de cimento (CPIII e CPV) e aço (galvanizado e comum). Após a cura, os espécimes foram ensaiados em laboratório conforme normas nacionais e internacionais. Os resultados indicam que concretos moldados com aço galvanizado tendem a apresentar melhor desempenho se comparados aos moldados com aço comum, desde que a alcalinidade da matriz cimentícia mantenha um pH da solução da água dos poros inferior a aproximadamente 12,5.

Palavras-chave: armadura galvanizada; concreto armado; corrosão por cloretos; estruturas; vida útil.

Behavior of concretes with galvanized reinforcement about chloride corrosion

ABSTRACT: Reinforced concrete structures frequently suffer from reinforcement corrosion in aggressive marine environments, a recurring and costly pathology for the construction industry. Mitigating this situation can result in more durable and cost-effective structural solutions in the long term. This paper analyzes the behavior of reinforced concrete structures cast with galvanized steel in relation to chloride-induced corrosion, the primary aggressive agent in coastal regions. Specimens were cast using different types of cement (CPIII and CPV) and steel (galvanized and common). After curing, the specimens were tested in the laboratory accordance to national and international standards. The results indicate that concretes molded with galvanized steel tend to present better performance than those molded with common steel under these conditions,

provided that the alkalinity of the cementitious matrix does not exceed a pore water solution pH of approximately 12.5.

Keywords: *chloride corrosion; galvanized reinforcement; reinforced concrete; service life; structures.*

1 Introdução

As estruturas de concreto armado são amplamente utilizadas na indústria da construção civil, dada a sua capacidade de transferir carga, adaptabilidade a diversas formas arquitetônicas, disponibilidade de matéria-prima e custo de implementação. Por estarem inseridas nos mais diversos tipos de ambiente, vários fatores podem afetar significativamente o comportamento e a durabilidade dessas estruturas (Bertolini *et al.*, 2004).

Nesse contexto, a corrosão de armaduras é um dos fenômenos patológicos mais recorrentes e onerosos em estruturas de concreto armado (Frankowski, 2018). Esse processo é, geralmente, desencadeado pela ação dos íons cloreto ou pela carbonatação do concreto (Bertolini *et al.*, 2004). Estima-se que os custos relacionados à corrosão representem aproximadamente 3,4% da riqueza gerada globalmente em um ano (Koch *et al.*, 2016). No Brasil, essa porcentagem equivale a cerca de 4% do PIB nacional, totalizando R\$ 270 bilhões em 2018 (IZA, 2015).

Considerando o impacto econômico gerado pela corrosão, estudos sobre a corrosão das armaduras por íons cloretos têm sido conduzidos desde a segunda metade do século XX, quando esse agente agressivo foi identificado como o principal causador da degradação de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos (Angst *et al.*, 2009). Sendo assim, estudos voltados à mitigação desse problema são essenciais para a construção de estruturas mais duráveis e economicamente viáveis, reduzindo o custo e o desperdício de matérias-primas.

Uma técnica economicamente atraente para a proteção contra a corrosão consiste na aplicação de uma camada protetora na superfície da armadura. Entre as soluções disponíveis, destaca-se a galvanização, pois preserva as propriedades mecânicas do aço e dispensa manutenção recorrente. Esse procedimento, relativamente simples, consiste em revestir o aço carbono com uma camada de zinco, proporcionando à armadura uma barreira protetora contra a corrosão (Macias; Andrade, 1987; Yeomans, 2023).

As armaduras galvanizadas tendem a apresentar melhor desempenho em relação às armaduras convencionais utilizadas em estruturas de concreto armado, tanto em ambientes com presença de cloretos quanto em concretos carbonatados (Macias; Andrade, 1987; Li; Guan; Shi, 2024). No entanto, a eficiência desse tipo de armadura depende das características da camada galvanizada e do meio ao qual está exposta (González; Andrade, 1982; Andrade; Macias, 1988; Farina; Duffó, 2007; Dewi *et al.*, 2023).

A galvanização confere à armadura uma proteção catódica, uma vez que o zinco atua como material de sacrifício, protegendo o aço subjacente (anodo da pilha de corrosão) e reduzindo significativamente a taxa de corrosão da armadura. Ademais, os produtos de corrosão do zinco são menos volumosos do que aqueles formados pelo aço carbono, o que minimiza a incidência de fissuras devido à variação volumétrica. Esses produtos também são mais pulverulentos e podem se dispersar na rede de poros do concreto

na interface aço/concreto, retardando a penetração de agentes agressivos (Li; Guan; Shi, 2024; Yeomans, 2004).

Vale destacar que a maioria dos estudos publicados investiga o comportamento das armaduras galvanizadas em condições que simulam o ambiente interno do concreto, utilizando soluções alcalinas que reproduzem a fase líquida do material. Os resultados indicam que as condições de passividade da barra e a formação dos produtos de corrosão dependem do pH da solução (Macias; Andrade, 1987; Candido; Meira; Abreu, 2020; Maeda *et al.*, 2020). Ensaaios com corpos de prova de concreto armado contendo armaduras galvanizadas demonstram que essas barras apresentam um teor crítico de cloretos superior ao do aço convencional, retardando significativamente a incidência de corrosão em altas taxas (Bautista; González, 1996; Darwin *et al.*, 2009; Dewi *et al.*, 2023).

Embora os estudos existentes indiquem um aumento na vida útil das estruturas de concreto armado com o uso de barras galvanizadas, ainda não é possível quantificar com precisão o ganho de desempenho proporcionado por esse revestimento. Isso se deve às incertezas quanto ao comportamento inicial da corrosão do revestimento galvanizado, às condições eletroquímicas ideais para a redução significativa da taxa de corrosão e à quantidade limite de cloretos necessária para a iniciação do processo corrosivo (Dewi *et al.*, 2023; Macias; Andrade, 1987). Ademais, o desempenho das barras galvanizadas no interior do concreto varia conforme a alcalinidade do meio (Macias; Andrade, 1987).

Esse aspecto é fundamental para compreender o papel do revestimento galvanizado na proteção anticorrosiva das barras de aço em estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos agressivos. Diante disso, a presente pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento de barras galvanizadas sob diferentes condições de alcalinidade e comparar seu desempenho com o das barras convencionalmente utilizadas em obra, buscando ampliar a compreensão sobre o mecanismo de corrosão dessas armaduras no concreto.

A avaliação do comportamento das barras galvanizadas considerará as principais variáveis que influenciam diretamente seu desempenho em ambientes de agressividade marinha, tais como: tempo para o início da corrosão, concentração superficial de cloretos, coeficiente de difusão, profundidade da zona de convecção, combinação de cloretos e teor crítico de cloretos (Cai *et al.*, 2020).

No restante deste artigo, a metodologia utilizada é apresentada na seção 2, na qual são descritos os ensaios normatizados e as práticas amplamente adotadas na literatura nacional e internacional. Os resultados experimentais são expostos e analisados na seção 3, com a discussão sobre o comportamento das variáveis que influenciam o desempenho das estruturas de concreto armado, considerando o tipo de ambiente e os materiais empregados. Por fim, na seção 4, são apresentadas as conclusões, juntamente com as recomendações para a adequada utilização desses materiais em ambientes agressivos.

2 Metodologia

Nesta seção, são apresentadas as metodologias de ensaios empregadas na realização do trabalho, com base nas variáveis analisadas.

2.1 Materiais e corpos de prova

Foram moldados três corpos de prova cúbicos de 80 mm × 80 mm × 80 mm em concreto para cada conjunto avaliado. O agregado graúdo utilizado era de origem granítica, com dimensão máxima característica de 12,5 mm, enquanto o agregado miúdo consistia em uma areia média lavada de rio, com módulo de finura igual a 2,54. Os aglomerantes empregados foram Cimento Portland com adição de escória de alto forno (CPIII) e Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI RS), cujas propriedades físicas e químicas estão apresentadas na Tabela 1. A composição química dos cimentos foi obtida por meio de ensaios realizados pelo fabricante do produto.

Tabela 1 ►

Composição química e propriedades físicas do cimento.
Fonte: dados da pesquisa

Características analisadas		Cimento utilizado	
		CPIII-RS	CPV-RS
Composição química (%)	MgO	–	3,78
	SO ₃	1,07	3,06
	CaO (livre)	1,01	1,66
Perda ao fogo (%) – NBR 17086-6/2023		0,18	4,79
Área específica – Blaine (cm ² /g) – NBR 16372/2023		4.657	4.270
Resíduos insolúveis – NBR 17086-4/2023		0,57	1,10
Massa específica (g/cm ³) – NBR 16605/2017		2,93	3,10

Tabela 2 ▼

Misturas do concreto e propriedades físicas.
Fonte: dados da pesquisa

O concreto analisado apresentava traço na seguinte proporção em massa: 1:2,2:2,8 (cimento: areia: brita), com relação água/cimento 0,55. As características físicas do concreto estão apresentadas na Tabela 2, assim como os valores de pH da solução do poro do concreto, cujo procedimento está descrito na subseção 2.2.

Características analisadas		Cimento utilizado	
		CPIII-RS	CPIII-RS
Slump test (mm) – NBR 16889/2020		65	70
Consumo de cimento (kg/m³)		340,1	338,9
pH da solução do poro (mol/L)		12,6	13,1
Absorção total – NBR 9778/2005	96 dias	Massa específica (g/cm³)	2,41
		Índice de vazios (%)	16,6
Resistência mecânica (MPa) – NBR 5738/2015	28 dias	27,8	32,4
	96 dias	33,2	37,6

Foram utilizados dois tipos de aço na confecção dos corpos de prova: aço carbono e aço galvanizado. Cada espécime foi concretado com duas barras de aço, ambas com bitola de 6,3 mm, comprimento de 100 mm e cobrimento de 20 mm. Antes da concretagem, as barras foram preparadas. As barras de aço carbono foram previamente limpas mecanicamente, seguida de limpeza química, conforme as recomendações da ASTM G-1 (ASTM, 2017). As barras galvanizadas foram obtidas a partir da mesma barra

de aço carbono e submetidas a limpeza em solução contendo 14% de ácido clorídrico e 14% de desengraxante por 10 minutos. Após a limpeza química, essas barras foram imersas em banho de zinco por 6 minutos, seguido de resfriamento em solução aquosa contendo 28% de cromatizantes à temperatura ambiente. Por fim, ambos os tipos de barras tiveram suas extremidades isoladas com resina epóxi, visando uma área de exposição de aproximadamente 600 mm².

Os espécimes foram desmoldados com 24 horas e curados em câmara úmida (UR ≥ 95%) por sete dias. Após esse período, permaneceram em ambiente de laboratório até completarem 96 dias e, posteriormente, tiveram quatro das seis faces pintadas com resina epóxi. Duas faces opostas permaneceram sem pintura para simular um fluxo unidirecional de penetração de cloretos no concreto. Concluída essa fase, os espécimes foram submetidos ao ensaio de transporte de cloretos em laboratório.

2.2 pH da água da solução do poro do concreto

O pH da solução do poro do concreto foi determinado conforme o procedimento descrito por Li, Nam e Hartt (2005). Uma mistura de água deionizada e pó de concreto (< 300 µm), na proporção de 1:1 em massa, foi mantida em solubilização por três dias. Após esse período, a solução teve seu pH medido com um pHmetro de bancada.

2.3 Ensaio acelerado de transporte de cloretos

Os ensaios de transporte de cloretos foram realizados por meio de ciclos de imersão em solução de cloreto de sódio (NaCl) a 1 molar por três dias, seguidos de secagem em estufa (T = 40 ± 5 °C) por quatro dias. No final de cada ciclo, as barras foram monitoradas por técnicas eletroquímicas (ver subseção 2.4) até a detecção do início da corrosão. A solução de cloretos foi feita utilizando água deionizada. Esses ciclos foram repetidos até a despassivação das barras de aço.

2.4 Medidas eletroquímicas

As medidas eletroquímicas utilizadas para verificar o início da corrosão da barra foram o potencial de corrosão (E_{corr}) e a densidade instantânea de corrente de corrosão (i_{corr}). Foi utilizado um potenciostato de bancada, modelo Gill AC da ACM Instruments. Todas as medições foram realizadas em uma gaiola de Faraday, para evitar interferências externas.

Para as medidas de potencial de corrosão, utilizou-se um eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (CSE) e um contraeletrodo de aço inoxidável, em condição de circuito aberto. A resistência à polarização linear (RP), com compensação da queda ôhmica, foi utilizada para a determinação da densidade de corrente de corrosão. As leituras foram realizadas sempre após as imersões em solução agressiva e foram realizadas até a detecção da despassivação das barras.

Os critérios adotados para indicar o início de corrosão foram: potencial de corrosão inferior a -350 mV (CSE), conforme a norma ASTM C-876 (ASTM, 2016); e densidade de corrente superior a 0,1 µA/cm², de acordo com a literatura (Angst *et al.*, 2009; Andrade; Alonso, 2004; Cigna *et al.*, 1997). A despassivação foi considerada consolidada após três medições consecutivas com densidade de corrente maior ou igual a 0,1 µA/cm².

2.5 Análise dos teores de cloretos

Após a confirmação da despassivação, a armadura foi removida dos espécimes, e cinco amostras foram extraídas a diferentes profundidades: 0-1 mm, 1-6 mm, 6-11 mm, 11-16 mm e 16-21 mm. As amostras foram pulverizadas manualmente, preparadas e analisadas para a determinação dos teores de cloretos livres e totais, seguindo as recomendações do RILEM TC 178-TMC (Vennesland; Climent; Andrade, 2013).

As titulações foram realizadas manualmente, conforme os procedimentos da ASTM C-114 (ASTM, 2018). Com os resultados das concentrações de cloretos livres e totais, foram elaborados os perfis de cloretos, relacionando a concentração de cloretos livres e totais com a profundidade. O teor de cloretos na região próxima à armadura, no momento da despassivação, foi considerado o limite crítico para o início da corrosão da armadura (Angst *et al.*, 2009; Meira *et al.*, 2014).

3 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia empregada na Seção 2. Os dados obtidos evidenciam os parâmetros que determinam o desempenho das estruturas de concreto armado frente à corrosão por cloretos, tais como: tempo de iniciação da corrosão, profundidade da zona convectiva, capacidade de fixação de cloretos, concentração superficial de cloretos, coeficiente de difusão de cloretos, teor crítico de cloretos e produtos de formação da corrosão.

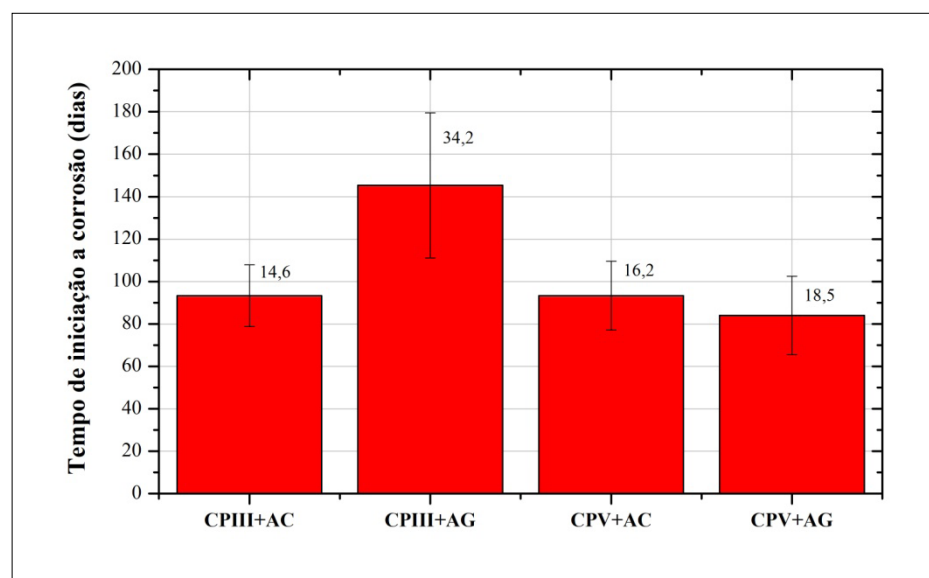
3.1 Tempo de iniciação da corrosão

Com base nas leituras eletroquímicas e nos critérios apresentados na subseção 2.4, foi determinado o tempo necessário para o início da corrosão. Os resultados estão apresentados na Figura 1, que mostra o tempo médio para o início do processo corrosivo.

Figura 1 ►

Tempo médio de iniciação da corrosão para as diferentes combinações de concreto em estudo.

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa



Os resultados indicam um tempo prolongado para a despassivação das armaduras nos concretos confeccionados com cimento CPIII e aço galvanizado, com um aumento médio de 57,4% em relação ao concreto de referência (CPIII + aço carbono). Em contraste, o pior desempenho foi observado nos concretos compostos por CPV e aço galvanizado, que apresentaram uma redução média de 11,2% no tempo para o início da corrosão em comparação com os concretos de referência (CPV + aço carbono). Esse comportamento será abordado na subseção 3.5.

Os resultados corroboram os apresentados por Rivera-Corral *et al.* (2017), os quais indicaram um aumento no tempo necessário para o início da corrosão em barras de aço galvanizado em comparação ao aço carbono. Esse comportamento é atribuído, principalmente, à proteção adicional proporcionada pelo revestimento de zinco.

3.2 Perfis de cloretos livres e totais

Os perfis de cloretos livres e totais no momento da confirmação da despassivação da armadura foram elaborados para cada combinação de aço e tipo de aglomerante. As Figuras 2 e 3 apresentam esses perfis, considerando os cloretos livres e totais, respectivamente. De maneira geral, os resultados indicam uma redução na concentração de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade. No entanto, esses perfis não apresentam uma diminuição gradativa das concentrações ao longo da profundidade.

Segundo Andrade e Alonso (1995), esse tipo de perfil exhibe a formação de um pico de concentração a poucos milímetros da superfície do concreto, fenômeno atribuído ao transporte convectivo motivado pelos ciclos de imersão e secagem. Em regiões mais internas, a condição saturada favorece o transporte predominantemente difusivo.

Figura 2 ►

Perfis de cloretos livres para os espécimes confeccionados com os cimentos CPIII (a) e CPV (b).

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa

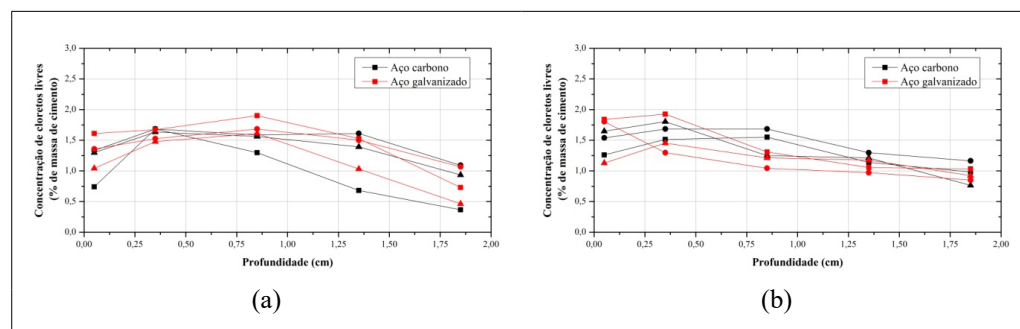
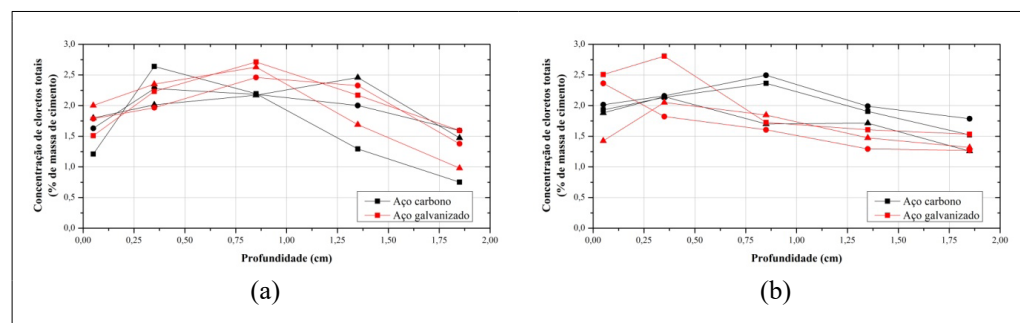


Figura 3 ►

Perfis de cloretos totais para os espécimes confeccionados com os cimentos CPIII (a) e CPV (b).

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa



Esse comportamento demonstra a influência significativa das condições ambientais sazonais, em que a entrada e saída de água contendo íons cloretos dissolvidos favorece

a formação do pico de concentração. Esse tipo de perfil, denominado perfil de duas zonas (Andrade; Alonso, 1995), também foi observado em estudos conduzidos por outros pesquisadores (Castro; Rincon; Pazini, 2001; Costa; Appleton, 1999).

Para avaliar a relação entre os perfis de cloretos e as variáveis estudadas (tipo de cimento e tipo de aço), foram elaboradas as Tabelas 3 e 4. Essas tabelas apresentam a variação média das concentrações de cloretos, camada a camada, para as diferentes combinações estudadas, tanto para cloretos totais quanto para cloretos livres.

Tabela 3 ►

Quantidade média de cloretos totais acumulados (% massa de cimento) na região do cobrimento da armadura.
Fonte: dados da pesquisa

Combinações	Aço carbono	Aço galvanizado
CPIII	39,9 ± 4,0%	42,8 ± 3,2%
CPV	40,4 ± 4,1%	37,1 ± 4,1%

Tabela 4 ►

Quantidade média de cloretos livres (% massa de cimento) na região do cobrimento da armadura.
Fonte: dados da pesquisa

Combinações	Aço carbono	Aço galvanizado
CPIII	27,2 ± 5,2%	28,6 ± 3,8%
CPV	28,0 ± 2,1%	25,2 ± 2,9%

Com base nos resultados, verifica-se que os concretos confeccionados com CPIII apresentam maiores concentrações de cloretos livres e totais em comparação aos concretos produzidos com CPV. Esse comportamento é atribuído ao maior tempo de exposição aos cloretos até a despassivação da armadura, resultando em maiores concentrações de cloretos livres e totais na interface armadura-concreto, conforme observado por Angst *et al.* (2009) e Meira *et al.* (2014).

Em relação aos tipos de armadura, percebe-se um aumento sutil nas concentrações de cloretos livres e totais nos concretos confeccionados com aço galvanizado, especialmente naqueles com CPIII. A análise cruzada das informações das Tabelas 3 e 4 revela que concretos com aço galvanizado e cimento CPIII, assim como os concretos com aço carbono e CPV, apresentaram maiores concentrações de cloretos livres e totais em comparação às demais combinações. O pior desempenho foi identificado nos espécimes moldados com CPV e aço galvanizado.

Embora a armadura não interfira no mecanismo de transporte dos agentes agressivos, as condições de passivação da armadura exigem um maior tempo para a iniciação da corrosão. Consequentemente, um maior teor de cloretos pode penetrar no interior do concreto, elevando as concentrações de cloretos livres e totais. Esse comportamento será discutido com mais detalhes na subseção 3.5, em associação com outros resultados experimentais.

3.3 Profundidade da zona convectiva e concentração máxima

A profundidade da zona de convecção e a concentração máxima de cloretos são indicadores importantes para estimar o grau de agressividade de um ambiente marinho e o desempenho de determinado material frente às condições de exposição (Cai *et al.*, 2020). Além das características relacionadas à interação entre o ambiente

Tabela 5 ▼

Média da profundidade da zona convectiva e concentração máxima de cloretos.

Fonte: dados da pesquisa

e a estrutura, essa região apresenta uma composição diferente do interior do concreto, devido à maior quantidade de pasta/argamassa e à ação da carbonatação (Andrade; Alonso, 1995).

Com base nos resultados dos perfis de cloretos livres e totais, foi elaborada a Tabela 5, que apresenta a profundidade da zona convectiva (Δx) e a concentração máxima de cloretos ($C_{\max}$) para os perfis analisados.

Combinações	Tempo de iniciação da corrosão (dias)	Cloretos livres		Cloretos totais	
		Δx (cm)	$C_{\max}$ (%)	Δx (cm)	$C_{\max}$ (%)
CPIII + aço carbono	93,3	$0,35 \pm 0,00$	$1,66 \pm 0,03$	$0,52 \pm 0,22$	$2,35 \pm 0,17$
CPIII + aço galvanizado	145,3	$0,85 \pm 0,00$	$1,73 \pm 0,10$	$0,85 \pm 0,00$	$2,61 \pm 0,09$
CPV + aço carbono	93,3	$0,68 \pm 0,22$	$1,69 \pm 0,06$	$0,68 \pm 0,22$	$2,33 \pm 0,12$
CPV + aço galvanizado	84	$0,25 \pm 0,13$	$1,56 \pm 0,24$	$0,35 \pm 0,00$	$2,24 \pm 0,37$

Os resultados mostram que concretos submetidos a maiores tempos de exposição tendem a apresentar profundidades superiores da zona convectiva e maiores concentrações de cloretos (livres e totais) em relação aos concretos com menor tempo de exposição ao ambiente agressivo. Esse comportamento corrobora estudos anteriores (Andrade; Alonso, 1995; Cai *et al.*, 2020; Costa; Appleton, 1999; Meira *et al.*, 2007) e pode ser atribuído ao maior número de ciclos de imersão e secagem em solução contendo cloretos. A variação da umidade externa intensifica o transporte de água contendo íons cloretos dissolvidos por convecção para o interior do concreto, acentuando o pico de concentração próximo à superfície (Cai *et al.*, 2020).

Ao analisar as diferentes combinações de materiais, observa-se que concretos produzidos com cimento CPIII e aço galvanizado tendem a apresentar maiores profundidades da zona convectiva e maiores concentrações de cloretos (livres e totais), devido ao tempo prolongado necessário para a iniciação do processo de corrosão. Em contrapartida, concretos moldados com CPV e aço galvanizado apresentaram camadas de convecção menos profundas e menores concentrações máximas de cloretos.

3.4 Combinação de cloretos na matriz cimentícia

Os íons cloretos podem estar presentes no interior do concreto em três formas: livres, quimicamente combinados aos produtos da hidratação do cimento ou fisicamente absorvidos. A fixação de cloretos reduz a velocidade de transporte desses íons na matriz cimentícia, uma vez que apenas os cloretos livres são responsáveis pela iniciação do processo corrosivo (Cascudo, 1997). Dessa forma, a avaliação da capacidade de fixação dos cloretos nas matrizes cimentícias é essencial para a compreensão do comportamento do material.

A Figura 4 apresenta a relação entre os teores de cloretos totais e livres para as diferentes combinações de materiais investigadas. Essa relação indica que, quanto maior a quantidade de cloretos totais em relação aos cloretos livres, maior é a capacidade de fixação dos cloretos na matriz cimentícia. Na mesma figura, ajustou-se a Isoterma de Langmuir aos dados experimentais. Os parâmetros ajustados da isoterma e o grau de qualidade dos ajustes são apresentados na Tabela 6.

Figura 4 ►

Relação entre cloretos totais e livres para as diferentes combinações de corpos de prova.

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa

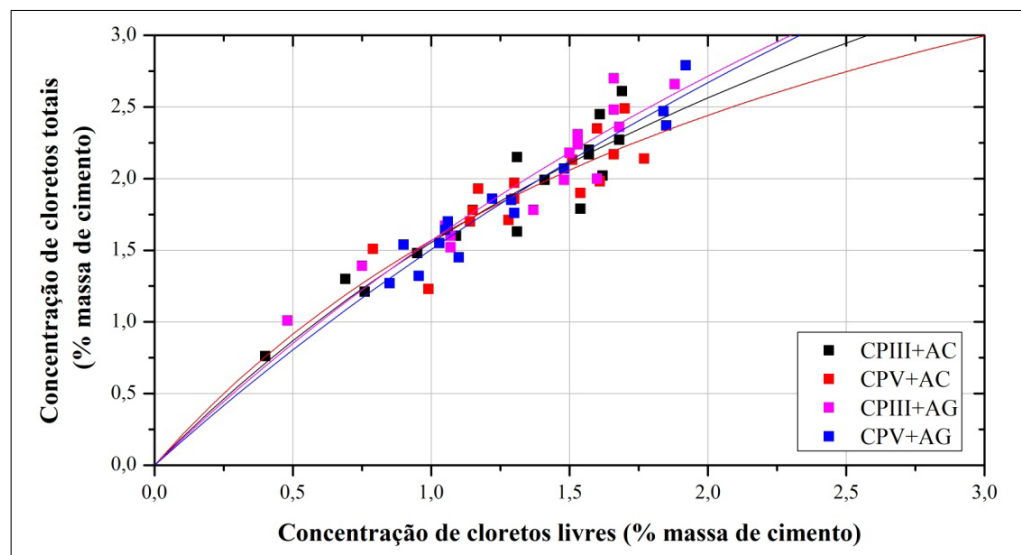


Tabela 6 ►

Parâmetros de ajuste para Isoterma de Langmuir.

Fonte: dados da pesquisa

Característica analisada	α	β	r^2
CPIII + aço carbono	1,971	0,269	0,922
CPIII + aço galvanizado	1,854	0,183	0,942
CPV + aço carbono	2,196	0,399	0,915
CPV + aço galvanizado	1,727	0,147	0,966

Os resultados indicam uma semelhança na capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia até uma concentração de cloretos livres de aproximadamente 1,25%. Após esse limite, observou-se uma leve tendência dos corpos de prova moldados com aço galvanizado a apresentarem maior relação entre cloretos totais e livres, em comparação com os moldados com aço carbono. A fixação de cloretos à matriz cimentícia é uma função intrínseca das condições físico-químicas do concreto. Esse comportamento pode estar relacionado ao tempo de exposição dos corpos de prova aos íons cloretos, permitindo a incorporação de uma maior quantidade desses íons ao concreto sem atingir a saturação da fixação.

Ao se comparar os diferentes tipos de cimento, observa-se que os concretos moldados com CPIII apresentam maior fixação de cloretos em relação aos moldados com CPV. Esse comportamento pode ser atribuído à maior capacidade de fixação de cloretos nos produtos de hidratação do cimento, resultado da adição de escória de alto-forno utilizada na fabricação do cimento CPIII. A composição química desse material (Tabela 1) favorece a fixação dos cloretos, principalmente nas fases hidratadas do cimento associadas ao cálcio e, em menor escala, aos aluminatos (Bertolini *et al.*, 2004).

3.5 Parâmetros de transporte de cloretos

Para uma análise mais aprofundada dos parâmetros que influenciam o transporte de cloretos no interior do concreto, foi empregado um procedimento matemático. Os perfis de cloretos livres foram ajustados à solução analítica da Segunda Lei de Fick (Equação 1), considerando que esses íons são efetivamente transportados e responsáveis pelo início da corrosão. O objetivo dos ajustes foi mensurar o comportamento das variáveis que influenciam

o transporte no interior do concreto, como a concentração superficial (C_s) e o coeficiente de difusão (D_{ns}).

$$C(x, t) = C_s + (C_\infty - C_s) \times \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \quad (1)$$

Onde: $C(x, t)$ representa a concentração de cloretos na profundidade x e no tempo t ; x é a profundidade no sentido do fluxo de ingresso dos cloretos; t é o tempo de exposição; C_∞ 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_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário.

Para os perfis clássicos de difusão, foi aplicado o ajuste direto à Equação 1. Já para os perfis de duas zonas, empregou-se a técnica de reescalonamento, na qual o perfil é ajustado a partir das camadas mais profundas, onde prevalece o transporte por difusão (Andrade; Sagrera; Sanjuán, 2000; Nilsson *et al.*, 2000). Os parâmetros de transporte foram obtidos a partir desses perfis. A técnica de reescalonamento é amplamente utilizada pela comunidade acadêmica para a determinação dos parâmetros de transporte em modelos de vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos agressivos (Cai *et al.*, 2020). Os resultados dos ajustes estão apresentados na Tabela 7, e a Figura 5 ilustra as médias e os desvios-padrão dos parâmetros de transporte ajustados.

Tabela 7 ▼

Concentração superficial e coeficiente de difusão de cloretos para os perfis de cloretos livres.

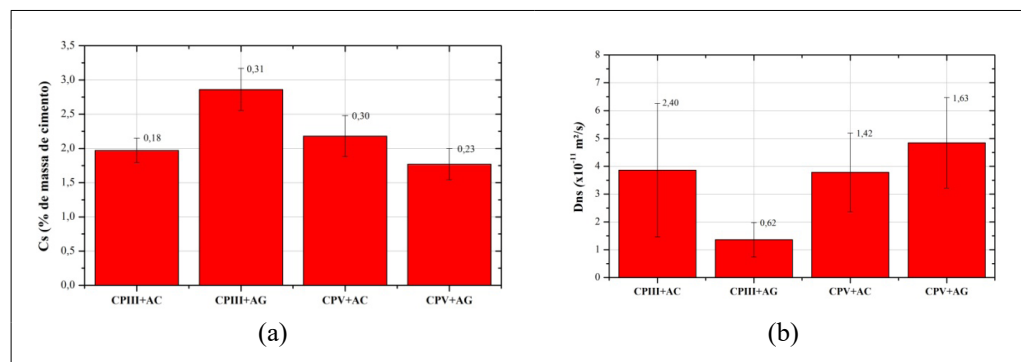
Fonte: dados da pesquisa

Espécime	Cobrimento (cm)	Idade (dias)	C_s (% de massa de cimento)	D_{ns} ($\times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$)	r^2
CPIII+AC – 1	2,2	98	1,813	4,31	0,672
CPIII+AC – 2	2,3	77	1,925	6,00	0,875
CPIII+AC – 3	2,0	105	2,160	1,26	0,981
CPIII+AG – 1	1,9	119	2,702	1,92	0,994
CPIII+AG – 2	1,8	133	2,661	1,46	0,815
CPIII+AG – 3	2,3	184	3,210	0,69	0,992
CPV+AC – 1	2,0	84	1,878	4,45	0,913
CPV+AC – 2	2,0	112	2,471	2,15	0,999
CPV+AC – 3	2,1	84	2,194	4,74	0,947
CPV+AG – 1	2,1	63	1,599	6,72	0,988
CPV+AG – 2	2,1	98	2,034	3,84	0,855
CPV+AG – 3	2,2	91	1,665	3,96	0,822

Figura 5 ►

Concentração superficial (a) e coeficiente de difusão de cloretos (b) para as diferentes combinações de espécimes.

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa



De maneira geral, os dados dos perfis de cloretos apresentaram bons ajustes à Equação 1, conforme evidenciado pela proximidade dos coeficientes de regressão (r^2) ao valor unitário. Os resultados das variáveis ajustadas indicam que os espécimes com maior tempo de exposição apresentaram maiores concentrações superficiais de cloretos e menores coeficientes de difusão de cloretos. Espécimes moldados com CPHI e aço galvanizado demonstraram melhor desempenho em relação a outras combinações de materiais, com um acréscimo entre 32% e 61%.

Apesar de os concretos moldados com CPHI apresentarem um maior índice de vazios (ver Tabela 2), verificou-se que exibiram menores coeficientes de difusão de cloretos. Esse comportamento possivelmente está relacionado à maior capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia, conforme demonstrado na subseção 3.4.

Quanto ao ambiente agressivo, mensurado neste estudo pela concentração superficial de cloretos, observou-se uma forte agressividade. O transporte de massa foi intensificado pelos ciclos de secagem em estufa e molhagem em solução agressiva, resultando em maiores concentrações superficiais de cloretos nos perfis de duas zonas, quando comparados aos perfis de uma zona (ver Figuras 2 e 3).

Para cada variável ajustada, a dispersão dos dados foi reduzida, mesmo com os ajustes sendo realizados em momentos distintos, visto que os perfis de cloretos foram montados no momento da despassivação da armadura. Essa dispersão nos dados pode ter sido minimizada pelos esforços na padronização das diferentes variáveis que influenciam as variáveis do fenômeno estudado – tais como tipo de aglomerante, fator água/finos, grau de hidratação, tipo de aço, condição superficial do aço, temperatura, umidade relativa – e, principalmente, pelo longo período de cura/repouso dos espécimes (96 dias) antes da exposição ao ambiente agressivo. Esse período prolongado de cura/repouso contribuiu para estabilizar a matriz cimentícia e, certamente, minimizou a influência da diferença de idade entre os espécimes, possibilitando uma comparação mais consistente.

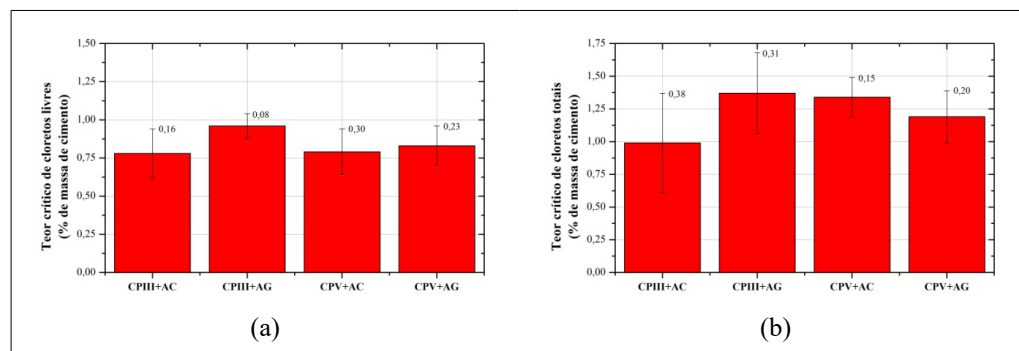
3.6 Teor crítico de cloretos

A simples presença de íons cloretos na proximidade da armadura não é suficiente para a ocorrência de corrosão. Para que esse processo seja iniciado, é necessário que os íons cloretos estejam presentes em quantidade suficiente, além da presença de água e oxigênio (Angst *et al.*, 2009). Diante da importância dessa variável no estudo, a Figura 6 apresenta a média do teor crítico de cloretos livres (Figura 6a) e totais (Figura 6b) para as diferentes combinações de cimento e armadura, após a eliminação de dados espúrios por meio da Técnica de Chauvenet.

Figura 6 ►

Teor crítico de cloretos livres (a) e totais (b) para as diferentes combinações de espécimes.

Fonte: elaborada pelos autores com dados da pesquisa



Os resultados relativos à concentração limite de cloretos livres indicam um aumento nos valores dessas variáveis quando se utiliza aço galvanizado, em comparação aos concretos com armadura convencional, considerando cada tipo de cimento individualmente. Observou-se um ganho de desempenho de 23,1% e 5%, nos concretos com CPIII e CPV, respectivamente. No entanto, em relação às concentrações limites de cloretos totais, esse comportamento não se mostrou claramente definido devido à dispersão dos resultados obtidos.

Considerando as combinações de tipos de cimento e armadura, verifica-se que as concentrações limites para a iniciação da corrosão são maiores nos corpos de prova moldados com CPIII e aço galvanizado, tanto para o teor crítico de cloretos livres quanto para os totais. Esse comportamento é atribuído a uma combinação de efeitos físicos e químicos, em que um melhor refinamento dos poros do concreto (ver Tabela 2) dificulta a penetração de cloretos (ver Tabela 7), enquanto as condições de pH do concreto (ver Tabela 2) favorecem a manutenção da capa protetora de zinco aderida à superfície do aço, reduzindo a taxa de corrosão (Macias; Andrade, 1987).

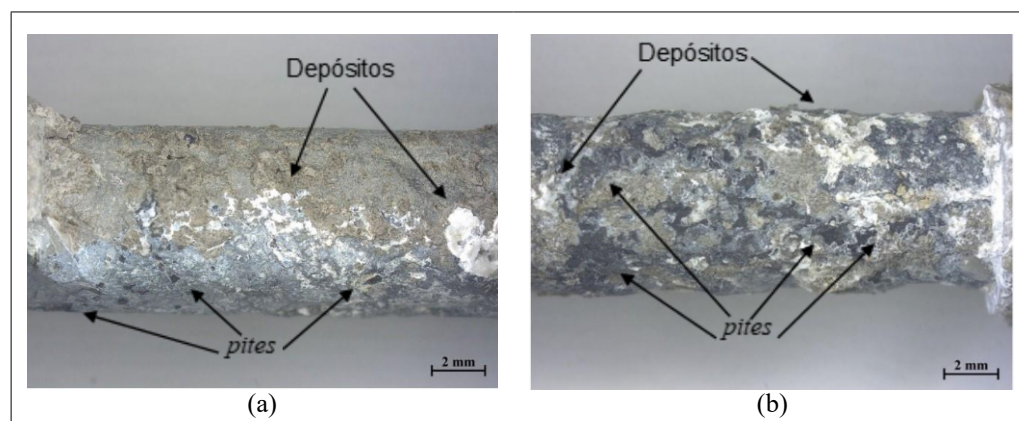
Os teores críticos de cloretos totais publicados na literatura mostram que os valores absolutos variam entre 0,33% e 1,60% de massa de aglomerante (Bertolini *et al.*, 2004; Rivera-Coral *et al.*, 2017; Yeomans, 2023), corroborando os dados obtidos neste estudo.

Apesar de os corpos de prova moldados com CPV e aço galvanizado apresentarem menor índice de vazios, maior pH da solução dos poros e uma camada protetora de zinco aderida à armadura, era esperado que tivessem melhor desempenho (maior teor crítico de cloretos e maior tempo de iniciação da corrosão) em comparação às demais combinações de materiais. Entretanto, os resultados indicam o contrário. A elevada alcalinidade do concreto comprometeu o equilíbrio eletroquímico da barra, facilitando o início da corrosão. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 7, que evidencia a dificuldade do zinco em passar em ambientes de elevada alcalinidade, como observado nos concretos moldados com cimento CPV.

Figura 7 ►

Barra de aço galvanizado para espécimes com cimento CPIII (a) e CPV (b), após a detecção do início da corrosão.

Fonte: arquivo dos autores



Os corpos de prova moldados com cimento CPIII e aço galvanizado (Figura 7a) apresentaram alguns *pites* de corrosão dispersos na área de exposição das barras, enquanto os corpos de prova moldados com cimento CPV e aço galvanizado (Figura 7b) exibiram diversas regiões onde o processo corrosivo se iniciou. Além disso, observou-se a formação intensa de depósitos esbranquiçados aderidos à superfície das barras galvanizadas. Segundo a literatura, essas áreas correspondem à formação de óxido de zinco (ZnO) e hidroxidocloreto de zinco ($\text{Zn}_5[\text{OH}]_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Belaïd; Arliguie; Francois, 2000; Maeda *et al.*, 2020; Li; Guan; Shi, 2024).

Segundo Belaïd, Arliguie e Francois (2000), o hidroxidocloreto de zinco apresenta volume maior em comparação a alguns produtos derivados da corrosão do aço comum. Esse fenômeno intensifica o processo de fissuração do revestimento do concreto, expondo ainda mais a armadura à ação de agentes agressivos, e potencializa o avanço da corrosão.

Dessa forma, a literatura aponta que o revestimento à base de zinco obtido por galvanização aumenta o tempo e a quantidade de cloretos necessários para o início da corrosão (teor crítico de cloretos) (Rivera-Coral *et al.*, 2017; Yeomans, 2023), o que foi confirmado neste trabalho. Entretanto, a formação de compostos insolúveis de zinco devido à alta concentração de cloretos na interface barra-concreto pode levar à fissuração do revestimento do concreto antes mesmo do surgimento de manchas avermelhadas de ferrugem (*pites*) (Rivera-Coral *et al.*, 2017).

4 Conclusões

Com base nos resultados discutidos nas sessões anteriores, nos quais diferentes tipos de espécimes foram moldados com cimento CPIII ou CPV e combinados com aço galvanizado ou aço carbono, ensaiados sob as mesmas condições, este estudo analisou o comportamento desses materiais frente à corrosão por cloretos. Os principais achados são:

- Os espécimes moldados com cimento CPIII e aço galvanizado apresentaram melhor desempenho frente à corrosão por cloretos, caracterizado por maiores tempos de despassivação, maior capacidade de fixação de cloretos e um teor crítico de cloreto mais elevado, em comparação às combinações com cimento CPV e os tipos de aços avaliados (carbono e galvanizado);
- Concretos moldados com aço galvanizado demonstraram tendência a um melhor desempenho em relação à corrosão por cloretos quando comparados aos concretos moldados com aço carbono, desde que a matriz cimentícia não apresente alta alcalinidade ($\text{pH} > 13$);
- A combinação de aço galvanizado e concreto de alta alcalinidade ($\text{pH} \approx 13$) resultou na formação de múltiplas regiões ativas na superfície da armadura dentro da mesma área de exposição. Esse efeito decorre da elevada alcalinidade do meio, que compromete a estabilidade do revestimento de zinco e reduz significativamente o tempo de iniciação da corrosão e o teor crítico de cloretos.

Diante desse cenário, recomenda-se cautela na utilização de armaduras galvanizadas em estruturas de concreto moldadas com cimentos de alta alcalinidade, como o Cimento Portland tipo V (CPV-ARI), especialmente em ambientes de elevada agressividade marinha, uma vez que essa combinação pode reduzir a vida útil dessas estruturas. Além disso, considerando a influência da alcalinidade na estabilidade da película passivante das armaduras galvanizadas, torna-se essencial a realização de estudos prévios sobre a

durabilidade desses sistemas em quaisquer contextos em que haja a presença de soluções alcalinas capazes de penetrar no concreto e desestabilizar o revestimento de zinco.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

CARVALHO, M. R.; FERREIRA, P. R. R.; MEIRA, G. R.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-4:** Cimento Portland – Análise química. Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-6:** Cimento Portland – Análise química. Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of skin effects on diffusion process in concrete. In: RILEM INTERNATIONAL WORKSHOP ON CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE, 1995, Paris. **Proceedings** [...]. Paris: RILEM, 1995. p. 182-194. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/7?id_papier=1128. Acesso em: 22 jun. 2023.

ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures**, v. 37, p. 623-643, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02483292>.

ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, 2., 2000, Paris. **Proceedings** [...]. Paris: RILEM, 2000. p. 121-134. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/24?id_papier=1788. Acesso em: 22 jun. 2023.

ANDRADE, M. C.; MACIAS, A. Galvanized reinforcements in concrete. In: WILSON, A. D.; NICHOLSON, J. W.; PROSSER, H. J. (ed). **Surface coatings – 2**. New York: Elsevier, 1988. p. 137-154. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-1351-6_5.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 12, p. 1122-1138, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-114**: standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. Philadelphia: ASTM, 2018.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-876**: standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia: ASTM, 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G-1**: standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Philadelphia: ASTM, 2017.

BAUTISTA, A.; GONZÁLEZ, J. A. Analysis of the protective efficiency of galvanizing against corrosion of reinforcements embedded in chloride contaminated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 2, p. 215-224, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00215-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00215-4).

BELAÏD, F.; ARLIGUIE, G.; FRANCOIS, R. Corrosion products of galvanized rebars embedded in chloride-contaminated concrete. **Corrosion – The Journal of Science & Engineering**, v. 56, n. 9, p. 960-965, 2000. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3280600>.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. B. **Corrosion of steel in concrete**: prevention, diagnosis, repair. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/3527603379>.

CAI, R.; HAN, T.; LIAO, W.; HUANG, J.; LI, D.; KUMAR, A.; MA, H. Prediction of surface chloride concentration of marine concrete using ensemble machine learning. **Cement and Concrete Research**, v. 136, 106164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106164>.

CANDIDO, T. G.; MEIRA, G. R.; ABREU, M. S. D. Avaliação do processo de corrosão em armaduras comuns e galvanizadas. **Revista Principia**, v. 51, p. 148-157, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2020v1n51p148-157>.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia: Pini: Editora UFG, 1997.

CASTRO, P.; RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 4, p. 529-537, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00453-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00453-7).

CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NÜRNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. **Corrosion and protection of metals in contact with concrete**. COST Action 509 – Final Report. Luxembourg: European Community, 1997.

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I: main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures**, v.32, p. 252-259, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02479594>.

DARWIN, D.; BROWNING, J.; O'REILLY, M.; XING, L.; JI, J. Critical chloride corrosion threshold of galvanized reinforcing bars. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 2, p. 176-183, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.14359/56465>.

DEWI, M. S.; SANCHAROEN, P.; KLOMJIT, P.; TANGTERMSIRIKUL, S. Effects of zinc alloy layer on corrosion and service life of galvanized reinforcing steels in chloride-contaminated concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 106153, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106153>.

FARINA, S. B.; DUFFÓ, G. S. Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 16, p. 5131-5139, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.014>.

FRANKOWSKI, P. K. Corrosion detection and measurement using eddy current method. In: 2018 INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY PHD WORKSHOP (IIPhDW), 2018, Swinoujście. **Proceedings** [...]. Swinoujście: IEEE, 2018. p. 398-400. DOI: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388398>.

GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. Effect of carbonation, chlorides and relative ambient humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete. **British Corrosion Journal**, v. 17, n. 1, p. 21-28, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1179/000705982798274589>.

IZA – INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. **Continuous galvanized rebar: an introduction**. Bruxelas: IZA, 2015. Disponível em: <https://www.zinc.org/continuous-galvanized-rebar-an-introduction>. Acesso em: 22 jun. 2023.

KOCH, G.; VARNEY, J.; THOMPSON, N.; MOGHISSI, O.; GOULD, M.; PAYER, J. **International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study**. Technical Report. Houston: NACE International Institute, 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Acesso em: 30 maio 2024.

LI, L.; NAM, J.; HARTT, W. H. Ex situ leaching measurement of concrete alkalinity. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 2, p. 277-283, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.024>.

LI, W.; GUAN, X.; SHI, J. Electrochemical behavior of zinc in alkali-activated fly ash solution. **Cement and Concrete Composites**, v. 146, 105395, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105395>.

MACIAS, A.; ANDRADE, C. Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions: Part1: electrochemical results. **British Corrosion Journal**, v. 22, n. 2, p. 113-118, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1179/000705987798271631>.

MAEDA, M.; LI, X.; OOI, A.; TADA, E.; NISHIKATA, A. Passivation mechanism of galvanized steel rebar in fresh concrete. **ISIJ International**, v. 60, n. 2, p. 337-345, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-396>.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, C.; BORBA JUNIOR, J. C. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.009>.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; VILAR, E. O.; NERY, K. D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.052>.

NILSSON, L.-O.; ANDERSEN, A.; TANG, L.; UTGENANNT, P. Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, 2., 2000, Paris. **Proceedings** [...]. RILEM, 2000.

RIVERA-CORRAL, J. O.; FARJADO, G.; ARLIGUIE, G.; OROZCO-CRUZ, R.; DEBY, F.; VALDEZ, P. Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: effect of surface finish. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 815-826, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.186>.

VENNESLAND, Ø.; CLIMENT, M. A.; ANDRADE, C. Recommendation of RILEM TC 178-TMC: testing and modelling chloride penetration in concrete. **Materials and Structures**, v. 46, p. 337-344, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9968-1>.

YEOMANS, S. R. (ed.). **Galvanized steel reinforcement in concrete**. Camberra: Elsevier, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044511-3.X5014-2>.

YEOMANS, S. R. Galvanized steel reinforcement: recent developments and future opportunities. In: POURSAEE, A. (ed.). **Corrosion of steel in concrete structures**. 2. ed. Clemson: Elsevier, 2023. p. 161-186. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03605-9>.