

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

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 de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

* autor correspondente

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 moldados 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 laboratórios conforme normas nacionais e internacionais. Os resultados indicam que concretos moldados com aço galvanizado tendem a apresentar melhor desempenho 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: estruturas; armadura galvanizada; concreto armado; corrosão por cloretos; vida útil.

Behavior of concretes with galvanized reinforcement about chloride corrosion

Abstract

Reinforced concrete structures frequently suffer from rebar corrosion in aggressive marine environments, a recurring and costly pathology for the construction industry. Mitigating this issue can lead to more durable and cost-effective structural solutions in the long term. This paper analyzes the behavior of reinforced concrete structures cast with galvanized steel concerning 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 following national and international standards. The results indicate that concrete cast with galvanized steel tends to perform better than that cast 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 as mais diversas formas de arquitetura, 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, p.44).

Nesse contexto, a corrosão de armaduras é um dos fenômenos mais recorrentes e onerosos dentre as manifestações patológicas encontradas nas 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, p.66). Em geral, os gastos com corrosão representam algo próximo a 3,4% de toda a riqueza gerada pelo mundo em um ano (Koch *et al.*, 2016). No Brasil, a corrosão representa algo próximo a 4% do PIB nacional, o que corresponde a R\$ 270 bilhões em 2018 (IZA, 2015).

Com base no ônus que a corrosão gera para a economia mundial, esforços têm sido dedicados ao estudo de corrosão armadura por íons cloretos desde a segunda metade do Século XX, quando esse

agente agressivo foi identificado como o principal causador de degradação de estruturas de concreto armado inseridos em ambiente de agressividade marinha (Angst *et al.*, 2009). Sendo assim, estudos que busquem mitigar esse problema são de extrema importância para confecção de estruturas mais racionalizadas e duráveis, reduzindo custo e o uso desnecessário de matérias-primas.

Uma técnica economicamente atraente de proteção contra corrosão é a aplicação de uma camada protetora na superfície da armadura. Dentre as soluções disponíveis, está a galvanização das armaduras, já que preserva as propriedades mecânicas do aço e não necessita de manutenção recorrente. Esse procedimento é simples e consiste em revestir o aço carbono com uma camada de zinco, conferindo à armadura uma barreira protetora contra corrosão (Macias; Andrade, 1987; Yeomans, 2023, p. 162).

As armaduras galvanizadas, em princípio, são capazes de apresentar um melhor desempenho que armaduras convencionais usadas em estruturas de concreto armado, tanto para ambientes com ação dos cloretos, como para concretos carbonatados (Macias; Andrade, 1987; Li; Guan; Shi, 2024). No entanto, o desempenho dessas armaduras galvanizadas depende das características da capa galvanizada, bem como do meio no qual essa armadura é inserida (González; Andrade, 1982; Andrade; Macias, 1988; Farina; Duffó, 2007; Dewi *et al.*, 2023).

A galvanização oferece a armadura uma proteção catódica, já que o zinco funciona como material de sacrifício em detrimento do aço (anodo da pilha de corrosão), reduzindo significativamente a taxa de corrosão da armadura. O zinco também gera produtos de corrosão menos volumosos que os formados pelo aço carbono em processo de corrosão, diminuindo a probabilidade do aparecimento de trincas, em função das tensões geradas pela variação volumétrica. Os produtos de corrosão do zinco também são mais pulverulentos e, portanto, podem se dispersar pela rede de poros do concreto na região da interface aço/concreto, retardando a chegada de agentes agressivos do exterior (Li *et al.*, 2024; Yeomans, 2004, p. 166).

Vale destacar que a maioria dos estudos publicados se refere ao comportamento das armaduras galvanizadas em ambientes que simulam as condições químicas oferecidas no interior do concreto, por meio de uma solução alcalina que sintetiza a fase líquida do concreto. Os resultados mostram que as condições de passividade da barra e os produtos de corrosão dependem do pH da solução (Macias; Andrade, 1987; Candido; Meira; Abreu, 2020; Maeda *et al.*, 2020). Estudos com espécimes de concreto armado com armaduras galvanizadas mostram que as barras de aço galvanizado apresentam um teor crítico de cloretos superior ao do aço convencional e retardam, significativamente, o aparecimento de altas taxas de corrosão (Bautista; González, 1995; Darwin *et al.*, 2009; Dewi *et al.*, 2023).

Embora os estudos analisados tenham demonstrado um aumento na vida útil das estruturas de concreto armado com o uso de barras galvanizadas, ainda não é possível determinar com segurança o ganho de desempenho oferecido pela galvanização da armadura, dadas as inúmeras incertezas sobre o comportamento inicial de corrosão do próprio revestimento galvanizado, as condições eletroquímicas ideais para se obter uma redução significativa da taxa de corrosão e a quantidade limite de cloretos para iniciação da corrosão (Dewi *et al.*, 2023; Macias; Andrade, 1987). Isso ocorre porque o comportamento 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 no desempenho anticorrosivo das barras de aço galvanizado em estruturas de concreto armado submetidas a ambientes de agressividade marinha. Diante disso, a pesquisa contida neste artigo visa analisar o comportamento de barras galvanizadas em diferentes condições de alcalinidade e propõe comparar o seu desempenho com as barras comumente usadas em obra, objetivando fornecer uma compreensão mais aprofundada do mecanismo de corrosão de barras de aço galvanizado em concreto.

Esse comportamento será avaliado levando em consideração as principais variáveis que influenciam diretamente no desempenho deste material frente aos ambientes de agressividade marinha, tais como: o tempo para início da corrosão, a concentração superficial de cloretos, o coeficiente de difusão, a profundidade da zona de convecção, a combinação de cloretos e o teor crítico de cloretos (Cai *et al.*, 2020).

No restante deste artigo, a metodologia utilizada é apresentada na Seção 2, onde ensaios normatizados e práticas amplamente usadas na literatura nacional e internacional foram empregados.

Os resultados experimentais são apresentados e analisados na Seção 3, onde se discute como as variáveis que influenciam no desempenho das estruturas de concreto armado podem se comportar em função do tipo de ambiente e dos materiais empregados. As conclusões estão na Seção 4, onde são apresentadas as recomendações para o bom emprego desses materiais em ambientes agressivos.

2 Metodologia

Nesta seção são apresentadas as metodologias de ensaios empregadas para a realização do trabalho, tomando como base as variáveis a serem analisadas.

2.1 Materiais e corpos de prova

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

Tabela 1 – Composição química e propriedades físicas do cimento

Características analisadas	Cimento utilizado		
	CPIII-RS	CPV-RS	
	MgO	-	3,78
Composição química (%)	SO ₃	1,07	3,06
	CaO (livre)	1,01	1,66
Perda ao fogo (%) - NBR 17086-6/23		0,18	4,79
Área específica – Blaine (cm ² /g) – NBR 16372/23		4657	4270
Resíduos insolúveis – NBR 17086-4/23		0,57	1,10
Massa específica (g/cm ³) – NBR 16605/17		2,93	3,10

Fonte: dados da pesquisa

O concreto estudado possui traço na seguinte proporção, em massa, 1:2,2:2,8 (cimento: areia: brita), com relação água/cimento 0,55, cujas características físicas estão apresentadas na Tabela 2. Os resultados do pH da solução do poro do concreto também estão apresentadas na Tabela 2, cujo procedimento para sua determinação está descrito na subseção 2.2.

Tabela 2 – Misturas do concreto e propriedades físicas

Características analisadas	Cimento utilizado		
	CPIII-RS	CPV-RS	
Slump test (mm) – NBR 16889/20	65	70	
Consumo de cimento (kg/m ³)	340,1	338,9	
pH da solução do poro (mol/L)	12,6	13,1	
Absorção total – NBR 9778/05	96 dias	96 dias	96 dias
	Massa específica (g/cm ³)	2,41	2,58
Resistência mecânica (MPa) – NBR 5738/15	Índice de vazios (%)	16,6	14,3
	28 dias	27,8	32,4
	96 dias	33,2	37,6

Fonte: dados da pesquisa

Dois tipos de aço foram usados 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, seguido por uma limpeza química, conforme recomendado pela ASTM G1 (2017). As barras galvanizadas tiveram origem da mesma barra de aço carbono, sendo essas limpas em solução contendo 14% de ácido clorídrico e 14% desengraxante por 10 minutos. Após a limpeza química, essas barras foram colocadas em banho de zinco por 6 minutos, seguido por um resfriamento em solução aquosa com 28% de cromatizantes na temperatura ambiente. Por fim, ambos os tipos de barras (carbono e galvanizado), tiveram suas extremidades isoladas com resina epóxi, objetivando uma área de exposição de aproximadamente 600mm².

Os espécimes foram desmoldados com 24 horas de sua moldagem e curados em câmara úmida ($UR \geq 95\%$) até completar sete dias. Finalizado o período de cura, os espécimes foram dispostos em ambiente de laboratório até completarem 96 dias e depois tiveram quatro das seis faces pintadas com resina epóxi. Duas faces opostas permaneceram sem pintura, visando simular um fluxo unidirecional para a penetração de cloretos no concreto. Finalizada a fase de preparação dos espécimes, eles foram submetidos a 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 seguindo o procedimento descrito por Li, Nam e Hartt (2005). Uma mistura de água deionizada e pó de concreto ($< 300 \mu\text{m}$) na proporção de 1:1 em massa foi deixada em solubilização por três dias. Após esse período, o pH da solução foi 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 e secagem em estufa ($T = 40 \pm 5^\circ\text{C}$) por quatro dias. No final de cada ciclo, as barras eram monitoradas por técnicas eletroquímicas (ver subseção 2.4) até que fosse detectado o 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 responsáveis pela verificação do início da corrosão na barra foram o potencial de corrosão (E_{corr}) e a densidade instantânea de corrente de corrosão (i_{corr}). Um potenciostato de bancada, modelo Gil AC da ACM Instruments foi usado para realizar as medidas eletroquímicas. Todas as medidas foram realizadas em uma gaiola de Faraday, de modo a evitar interferências externas.

Para as medidas de potencial de corrosão, foi usado um eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (CSE) e um contra eletrodo de aço inoxidável, em condição de circuito aberto. A medida de resistência à polarização linear (RP) com compensação da queda ôhmica foi usada para 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 na barra foram potencial de corrosão inferior a -350 mV (CSE), seguindo as recomendações da ASTM C-876 (2016), e densidade de corrente superiores a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, seguindo as recomendações usadas pela literatura (Angst *et al.*, 2009; Andrade; Alonso, 2004; Cigna *et al.*, 1997). A despassivação era aceita como consolidada após três medidas consecutivas com densidade de corrente maior ou igual a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, para evitar ocorrência de ciclos de despassivação e repassivação.

2.5 Análise dos teores de cloretos

Comprovada a despassivação, a armadura foi cuidadosamente removida dos espécimes, e cinco amostras foram extraídas a diferentes profundidades em relação à superfície. As camadas tinham as seguintes profundidades: 0-1 mm, 1-6 mm, 6-11 mm, 11-16 mm e 16-21 mm. Essas 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 *et al.*, 2013).

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

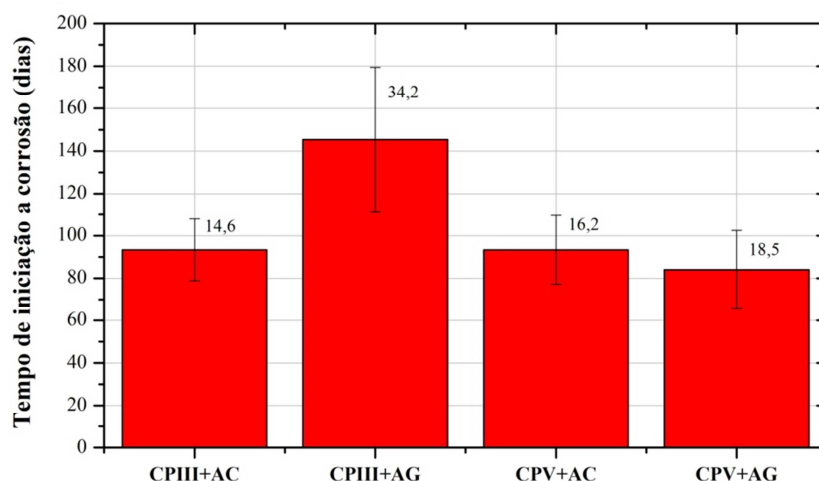
3 Resultados e discussões

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

3.1 Tempo de iniciação da corrosão

Com base nos resultados das leituras eletroquímicas e nos critérios apresentados na subseção 2.4, foi determinado o tempo necessário para início da corrosão. Os resultados estão apresentados na Figura 1, onde o tempo médio para o início da corrosão é apresentado.

Figura 1 – Tempo médio de iniciação da corrosão para diferentes combinações de concreto em estudo



Fonte: dados da pesquisa

Os resultados indicam um tempo maior para despassivação das armaduras nos concretos confeccionados com cimento CIII + aço galvanizado, um aumento médio de 57,4%, em relação ao concreto de referência (CIII + aço carbono). Em contraste, o pior desempenho foi observado nos concretos com CPV + aço galvanizado, apresentando uma redução média de 11,2% no tempo para o início da corrosão sem comparação aos concretos de referência (CPV + aço carbono). Esse comportamento será discutido na subseção 3.5.

Estes resultados corroboram com os resultados apresentados por Rivera-Corral *et al.* (2017), em que o tempo para a iniciação da corrosão aumentou para as barras com aço galvanizado em comparação com o aço comum. Esse comportamento é atribuído principalmente à proteção extra proporcionada pelo revestimento.

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. Esses perfis estão apresentados nas Figuras 2 e 3, considerando os cloretos livres e totais, respectivamente. Os resultados mostram, de modo geral, uma redução na concentração de cloretos livres e totais com o aumento da profundidade.

No entanto, esses perfis não exibem um comportamento de redução gradativa das concentrações com a profundidade. Segundo Andrade e Alonso (1997), esse tipo de perfil apresenta a formação de um pico de concentração a poucos milímetros da superfície do concreto, devido ao mecanismo de transporte ser predominantemente convectivo, motivado pelos ciclos de imersão e secagem. Já nas regiões mais internas, a condição saturada favorece o comportamento difusivo.

Figura 2 – Perfis de cloretos livres para os espécimes confeccionados com os cimentos CPIII (a) e CPV (b)

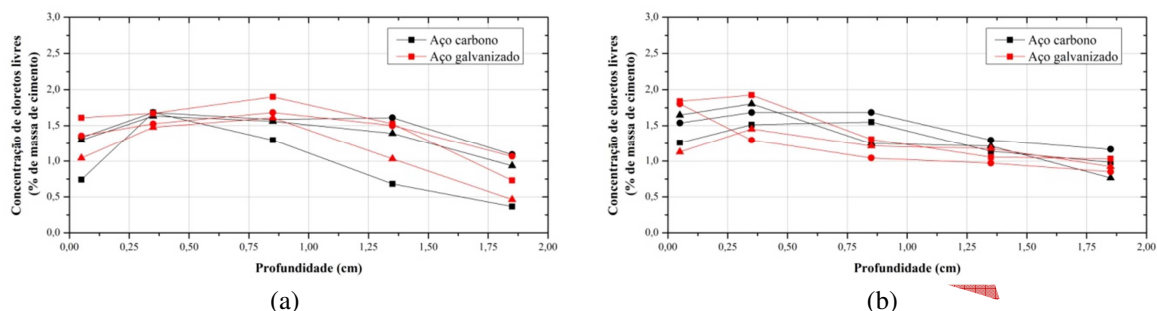
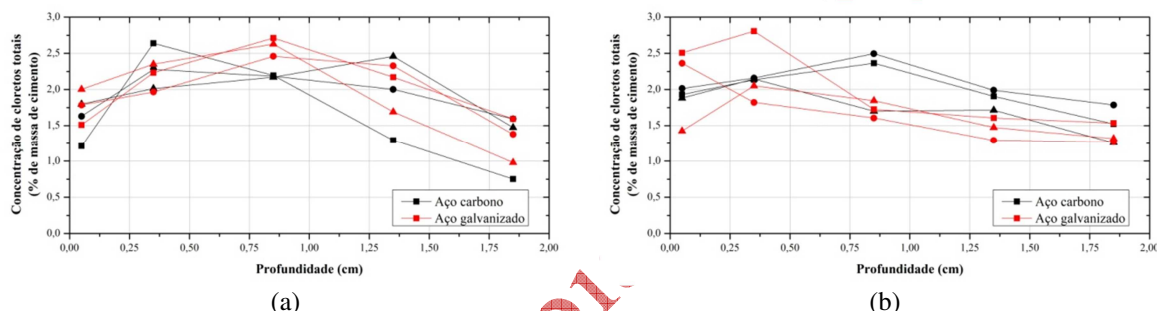


Figura 3 – Perfis de cloretos totais para os espécimes confeccionados com os cimentos CPIII (a) e CPV (b)



Fonte: dados da pesquisa

Esse tipo de comportamento demonstra a forte influência das condições sazonais do ambiente, onde a entrada e saída de água contendo íons cloretos dissolvidos favorece a formação desse pico de concentração. Esse tipo de perfil é denominado perfil de duas zonas (Andrade; Alonso, 1997) e foi observado por outros pesquisadores (Castro; Rincon; Pazini, 2001; Costa; Appleton, 1999).

Comparando os perfis de cloretos com as variáveis estudadas (tipo de cimento e tipo de aço), foram elaboradas as Tabelas 3 e 4. Elas mostram a variação média das concentrações de cloretos, camada a camada, para as variáveis em estudo, tanto para cloretos totais, como cloretos livres, respectivamente.

Tabela 3 – Quantidade média de cloretos totais acumulados (% massa de cimento) na região do cobrimento da armadura

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.

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

Fonte: dados da pesquisa

Com base nos resultados, pode-se inferir que os concretos confeccionados com CPIII, apresentam maiores concentrações de cloretos livres e totais em comparação aos concretos feitos com CPV. Esse comportamento se deve ao maior tempo de exposição aos cloretos até a despassivação,

resultando em maiores concentrações de cloretos livres e totais na armadura, como observado por Angst *et al.* (2009) e Meira *et al.* (2014).

Em relação aos tipos de armadura, percebe-se um sutil aumento nas concentrações de cloretos livres e totais nos concretos confeccionados com aço galvanizado, principalmente para aqueles dosados com CPIII. Cruzando as informações das Tabelas 3 e 4, observa-se que concretos com aço galvanizado e cimento CPIII, além dos concretos com aço carbono e CPV, apresentaram maiores concentrações de cloretos livre e totais em comparação com outras combinações. O pior desempenho foi observado 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, mais cloretos podem penetrar no interior do concreto, aumentando as concentrações de cloretos livres e totais. Esse comportamento será mais bem debatido na subseção 3.5, quando essas características forem associadas a outros resultados de ensaios.

3.3 Profundidade da zona convectiva e concentração máxima

A profundidade da zona de convecção e a concentração máxima de cloretos são dois indicadores importantes para estimar o grau de agressividade de um ambiente marinho e desempenho de um determinado material frente às condições de uso (Cai *et al.*, 2020). Além das características relacionadas à interação ambiente-estrutura, essa região também apresenta uma composição diferenciada do interior do concreto, devido à maior quantidade de pasta/argamassa e ação da carbonatação (Andrade, 1997).

Com base nos resultados dos perfis de cloretos livres e totais, foi confeccionada a Tabela 5, que mostra a profundidade da zona de convecção (Δx) e a concentração máxima de cloretos (C_{max}), para os perfis de cloretos livres e totais.

Tabela 5 – Média da profundidade da zona convectiva e concentração máxima de cloretos

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

Fonte: dados da pesquisa

Os resultados mostram que concretos com maior tempo de exposição tendem a apresentar profundidades de zona convectiva e concentrações máximas de cloretos (livres e totais) do que os concretos com menor tempo de exposição ao ambiente agressivo. Esse comportamento corrobora com outros estudos já publicados (Andrade; Alonso, 1997; Cai *et al.*, 2020; Costa; Appleton, 1999; Meira *et al.*, 2007) e se deve a maior número de ciclos de imersão e secagem em solução contendo cloretos. A flutuação na umidade externa intensifica o transporte de água com íons cloretos dissolvido, por convecção, para o interior do concreto, acentuando o pico de concentração próximo à superfície (Cai *et al.*, 2020).

Observando as combinações de materiais, percebe-se que concretos confeccionados com cimento CPIII e aço galvanizado tendem a apresentar maiores profundidades de zona convectiva e concentrações máximas de cloretos (livres e totais), devido ao maior tempo necessário para iniciação da corrosão. Em contrapartida, os concretos moldados com CPV e aço galvanizado apresentaram menores camadas de convecção e concentrações máximas de cloretos.

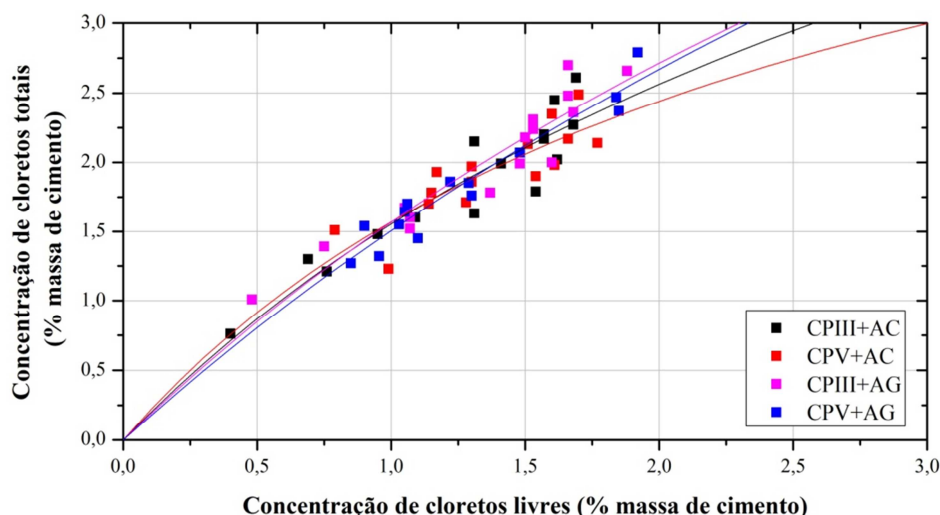
3.4 Combinação de cloretos na matriz cimentícia

Os íons cloretos podem está no interior do concreto em três formas: livres, quimicamente combinados aos produtos da hidratação do cimento ou fisicamente absorvidos. A fixação de cloretos diminui a velocidade de transporte desses íons na matriz de concreto, uma vez que apenas os cloretos livres se movem para o interior e podem iniciara corrosão (Casculo, 1997, p. 45). Portanto, analisar a

capacidade de fixação das matrizes cimentícias é de total importância para compreensão do comportamento do material.

A Figura 4 mostra a relação entre cloretos totais e livres para as combinações de materiais em estudo. A relação cloretos totais e livres indica que, quanto maior a quantidade de cloretos totais em relação aos cloretos livres, maior é a quantidade de cloretos combinados na matriz cimentícia. Ainda na mesma figura, ajustou-se a Isoterma de Langmuir aos dados experimentais. Os parâmetros da função da isoterma e o grau de qualidade dos ajustes estão mostrados na Tabela 6.

Figura 4 – Relação entre cloretos totais e livres para as diferentes combinações de corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa

Tabela 6 – parâmetros de ajuste para Isoterma de Langmuir

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

Fonte: dados da pesquisa

Os resultados revelam uma semelhança na capacidade de fixação de cloretos da matriz cimentícia até aproximadamente a concentração de cloretos livres de 1,25%. Após esse ponto de convergência entre os ajustes, é possível observar uma leve tendência dos espécimes moldados com aço galvanizado de tolerarem uma maior relação entre cloretos totais e livres em comparação com o aço carbono, se comparados com os concretos de referência. A fixação de cloretos a matriz cimentícia é uma função intrínseca das condições físico-químicas do concreto. Esse comportamento pode estar associado ao tempo de exposição dos espécimes aos íons cloretos, onde mais íons cloretos ingressaram ao interior do concreto e se combinaram, e a não saturação da fixação dos cloretos a matriz cimentícia.

Comparando os tipos de cimento, observa-se pelos ajustes, que concretos moldados com CPIII tendem a apresentar maior fixação de cloretos do que concretos moldados com CPV. Esse comportamento possivelmente se deve à maior capacidade de fixação de cloretos com os produtos de hidratação do cimento, resultante da adição de escória de alto forno usada no processo de fabricação do cimento CPIII. A composição química do material (conforme Tabela 1) propicia a fixação de cloretos originada das fases do cimento hidratado associadas, principalmente, ao cálcio e, secundariamente, aos aluminatos (Bertolini *et al.*, 2004, p. 98).

3.5 Parâmetros de transporte de cloretos

Partindo para uma análise mais aprofundada dos parâmetros que influenciam o transporte de cloretos no interior do concreto, um procedimento matemático foi empregado. Os perfis de cloretos livres foram ajustados à solução analítica da Segunda Lei de Fick (Equação 1), pois esses íons são

efetivamente transportados e responsáveis pelo início da corrosão. O objetivo dos ajustes é 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: $C(x,t)$ é 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; D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não-estacionário.

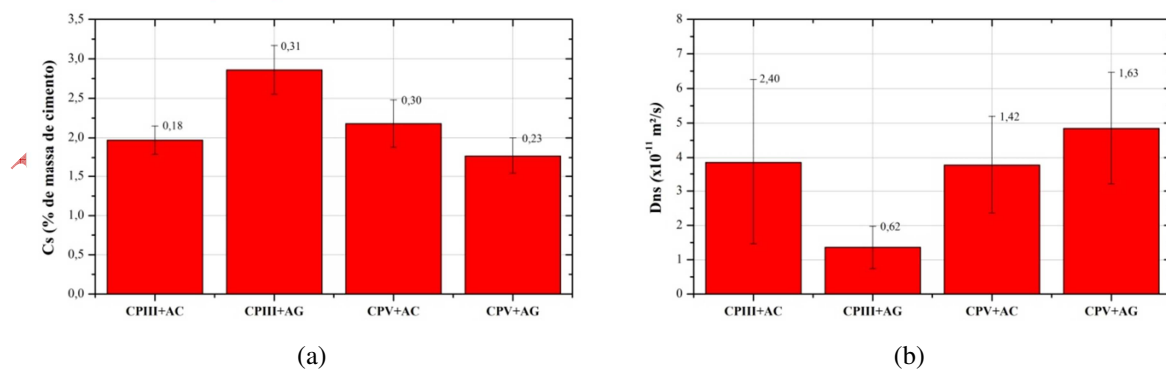
Aos perfis clássicos de difusão, foi aplicado o ajuste direto à Equação 1. Já aos perfis de duas zonas, foi aplicada a técnica de reescalonamento, onde o perfil é ajustado a partir das camadas mais profundas, prevalecendo o transporte por difusão (Andrade; Sagrera; Sanjuán, 2000; Nilsson *et al.*, 2000).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

Tabela 7 – Concentração superficial e coeficiente de difusão de cloretos para os perfis de cloretos livres

Espécime	Cobrimento (cm)	Idade (dias)	C_s (% de massa de cimento)	D_{ns} ($\times 10^{-11}$ m ² /s)	r^2
CPH+AC – 1	2,2	98	1,813	4,31	0,672
CPH+AC – 2	2,3	77	1,925	6,00	0,875
CPH+AC – 3	2,0	105	2,160	1,26	0,981
CPH+AG – 1	1,9	119	2,702	1,92	0,994
CPH+AG – 2	1,8	133	2,661	1,46	0,815
CPH+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

Fonte: dados da pesquisa

Figura 5 – Concentração superficial (a) e coeficiente de difusão de cloretos (b) para as diferentes combinações de espécimes



Fonte: dados da pesquisa

De maneira geral, observa-se que 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 mostram que os espécimes com maior tempo de

exposição apresentaram maiores concentrações superficiais de cloretos e menores coeficientes de difusão de cloretos. Espécimes moldados com CIII e aço galvanizado demonstraram melhor desempenho do que outras combinações de materiais, com um acréscimo entre 32 e 61%. É importante destacar que, apesar dos concretos moldados com CIII apresentarem um maior índice de vazios (ver Tabela 2), eles apresentaram menores coeficientes de difusão de cloretos. Isso possivelmente se deve à maior capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia, como mostrado na subseção 3.4.

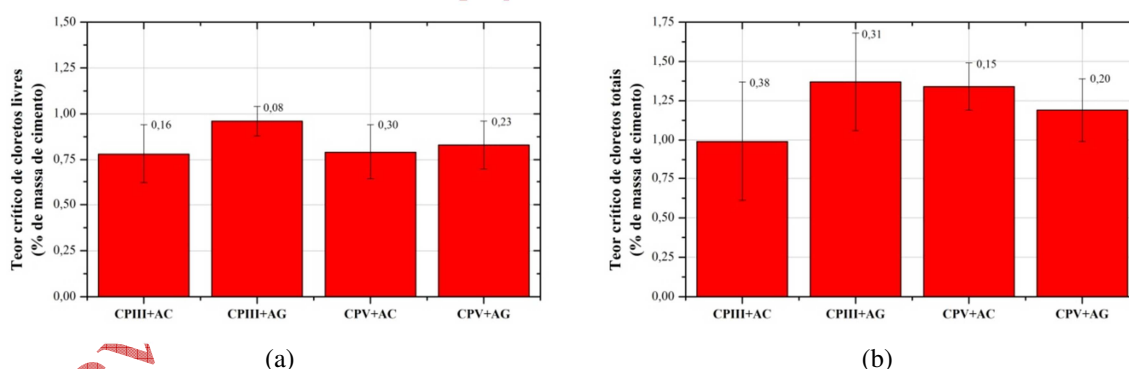
Com relação ao ambiente agressivo, mensurado neste estudo pela concentração superficial de cloretos, percebe-se a forte agressividade do ambiente. O transporte de massa foi acelerado pelos ciclos de secagem em estufa e molhagem em solução agressiva, resultando em maiores concentrações superficiais de cloretos em perfis de duas zonas, em comparação com perfis de uma zona (ver Figuras 2 e 3).

Para cada variável ajustada, observa-se uma pequena dispersão dos dados, mesmo com os ajustes sendo realizados em momentos distintos, já que os perfis de cloretos foram montados no momento da despassivação da armadura. Essa dispersão nos dados pode ter sido atenuada pelos esforços na padronização das diferentes variáveis que influenciam as variáveis em estudo, 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 longo período de cura/repouso dos espécimes contribuiu para estabilizar a matriz cimentícia e, certamente, minimizou a influência da diferença de idade, possibilitando uma comparação geral.

3.6 Teor crítico de cloretos

Detectar a presença de íons cloretos na proximidade da armadura não é suficiente para que a corrosão aconteça. É necessário que os íons cloretos estejam em quantidade suficiente, além de água e oxigênio, para iniciar o processo de corrosão da armadura (Angst *et al.*, 2009). Diante da importância dessa variável no estudo, a Figura 6 mostra 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 pela Técnica de Chauvenet.

Figura 6 – Teor crítico de cloretos livres (a) e totais (b) para as diferentes combinações de espécimes



Fonte: dados da pesquisa

Os resultados de concentração limite de cloretos livres mostram um aumento nos valores dessas variáveis, quando se utiliza aço galvanizado em comparação aos concretos que utilizam armadura convencional, isso comparando cimento a cimento. Observou-se um ganho de desempenho de 23,1% e 5%, para concretos com CIII e CPV, respectivamente. No entanto, em relação às concentrações limites de cloretos totais, esse comportamento não ficou claramente definido devido à dispersão dos resultados obtidos.

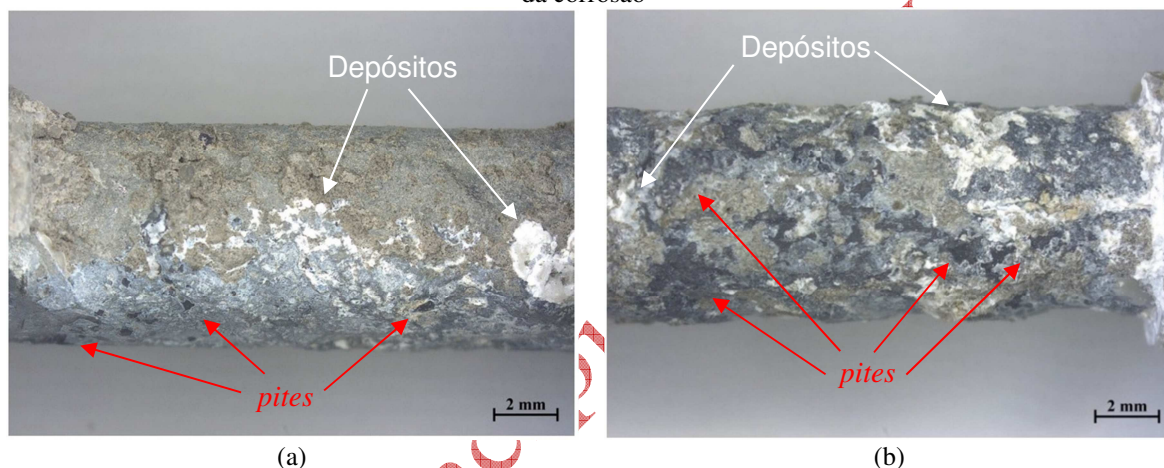
Considerando as combinações de tipos de cimento e armadura possíveis, observa-se que as concentrações limite para iniciação da corrosão são maiores nos corpos de prova moldados com CIII e aço galvanizado, tanto para o teor crítico de cloretos livres quanto para os totais. Este comportamento deve-se a uma combinação de efeitos físicos e químicos, onde um melhor refinamento dos poros do concreto (ver Tabela 2) dificulta a penetração de cloretos (ver Tabela 7) e as condições

de pH do concreto (ver Tabela 2) fornecem as condições de equilíbrio necessárias para 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 em uma faixa entre 0,33 e 1,60% de massa de aglomerante (Bertolini *et al.*, 2004, p. 97; Riverra-Coral *et al.*, 2017; Yeomans, 2023, p. 171), corroborando com os dados aqui coletados.

Levando em consideração que os corpos de prova moldados com CPV e aço galvanizado têm menor índice de vazios, maior pH da solução do poro e camada protetora de zinco aderida à armadura, era de se esperar que o mesmo tivessem melhor desempenho (maior teor crítico de cloretos e maior tempo de iniciação a corrosão) que as outras combinações de materiais. Entretanto, constatou-se que não foi caso. Devido à alta alcalinidade do concreto, o equilíbrio eletroquímico da barra ficou comprometido, facilitando o início da corrosão. Esse comportamento pode ser visto na Figura 7 e representa a dificuldade do zinco em passar em ambientes de elevada alcalinidade, como pode ser observado em concretos moldados com cimento CPV.

Figura 7 – Barra de aço galvanizado para espécimes com cimento CIII (a) e CPV (b), após a detecção do início da corrosão



Fonte: arquivo dos autores

Os corpos de prova moldados com cimento CIII e aço galvanizado (Figura 7a) apresentaram alguns *pites* de corrosão espalhados na área de exposição das barras, enquanto os corpos de prova moldados com cimento CPV e aço galvanizado (Figura 7b) apresentaram várias regiões onde o processo corrosivo se iniciou. Também é possível notar a intensa formação de depósitos esbranquiçados aderidos à superfície das barras galvanizadas. Segundo a literatura, nessas áreas há a formação de óxido de zinco (ZnO) e hidróxicloreto de zinco ($Zn_5[OH]8Cl_2 \cdot H_2O$) (Belaïd; Arliguie; Francois, 2000; Maeda *et al.*, 2020; Li; Guan; Shi, 2024).

Segundo Belaïd *et al.* (2000), o hidróxicloreto de zinco apresenta volume maior que alguns produtos oriundos da corrosão do aço comum. Esse processo de formação do hidróxicloreto de zinco intensifica o processo de fissuração do revestimento do concreto, deixando a armadura ainda mais exposta à ação dos agentes agressivos e potencializando o processo de corrosão.

Sendo assim, a literatura observou que o revestimento à base de zinco obtido por galvanização aumentou o tempo e a quantidade de cloretos necessários para início da corrosão (teor crítico de cloretos) (Riverra-Coral *et al.*, 2017; Yeomans, 2023, p. 171), como mostrado neste trabalho. Entretanto, compostos insolúveis de zinco formados devido à alta concentração de cloretos na interface barra-concreto podem fissurar o revestimento do concreto antes mesmo do aparecimento de manchas vermelhas de ferrugem (*pites*) (Riverra-Coral *et al.*, 2017).

4 Conclusões

Com base nos resultados discutidos nas sessões anteriores, onde diferentes tipos de espécimes foram moldados com cimento CIII ou CPV e combinados com aço galvanizado ou aço carbono,

ensaiados sobre mesmas condições, este estudo se dedicou a analisar o comportamento desses materiais frente à corrosão por cloretos. Pode-se concluir que:

- Espécimes moldados com cimento CPIII e aço galvanizado apresentaram melhor desempenho (maiores tempos para despassivação, maior capacidade de fixação de cloretos e teor crítico de cloreto mais elevado) frente à corrosão por cloretos em comparação aos concretos moldados com as combinações de CPV e aços (carbono e galvanizado);
- Concretos moldados com aço galvanizado tendem a apresentar uma melhora no desempenho (maiores tempos para despassivação, maior capacidade de fixação de cloretos e teor crítico de cloreto mais elevado) frente à corrosão por cloretos em comparação aos concretos moldados com aço carbono, desde que a matriz cimentícia não apresente alta alcalinidade ($\text{pH} > 13$);
- Concretos moldados com aço galvanizado e alta alcalinidade ($\text{pH} \approx 13$) tendem a apresentar várias regiões ativas na superfície da armadura em uma mesma área de exposição. Essa situação decorre da elevada alcalinidade do meio, que afeta a estabilização do zinco e contribui para uma redução considerável no tempo de iniciação a corrosão e no teor crítico de cloretos.

Diante do cenário apresentado, recomenda-se cautela na execução de estruturas de concreto com armadura galvanizada e cimentos com alta alcalinidade, como o Cimento Portland tipo V (CPV-ARI), tendo em vista uma redução no tempo de vida útil dessas estruturas em ambientes de agressividade marinha. Estendendo essa limitação do material a outros cenários, faz-se necessário um estudo prévio de concretos moldados com armadura galvanizada em quaisquer ambientes com fonte de solução alcalina, já que os íons alcalinos podem também penetrar o concreto e desestabilizar a película passivante dessas armaduras.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

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.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, O. 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.

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

ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of skin effects on diffusion process in concrete. *In*: RILEM INTERNATIONAL WORKSHOP ON CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE, 1997, Paris. **Proceedings** [...]. Paris: RILEM; p.182-194, 1997. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/7?id_papier=1128.

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, 2º, 2000, Paris. **Proceedings** [...]. RILEM, 2000. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/24?id_papier=1788.

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-VCD, 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**. Co-edição, 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. European Community: Luxembourg, 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.job.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, p. 398-400, 2018. 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>.

KOCH, G.H.; 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.

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

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. **Galvanized steel reinforcement in concrete**. 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. **Corrosion of steel in concrete structures**.2. ed. Elsevier, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03605-9>.