



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIEL PINHEIRO DE OLIVEIRA

**CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO: O PROCESSO,
CAUSAS E TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO**

TERESINA - PI

2026

GABRIEL PINHEIRO DE OLIVEIRA

CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO: O PROCESSO,
CAUSAS E TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Orientador: Prof. Dr. Helder Pontes Gomes.

TERESINA - PI

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Oliveira, Gabriel Pinheiro de

O48c Corrosão de armaduras em concreto armado : o processo, causas e técnicas de mitigação / Gabriel Pinheiro de Oliveira. - 2025.
75 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Zona Sul, 2025.

Orientador : Prof Dr. Helder Pontes Gomes.

1. Corrosão. 2. Concreto armado. 3. Carbonatação. 4. Cloretos. 5. Proteção catódica I.Título.

CDD - 624

Elaborado por Rudney do Carmo Paz CRB 3/1117

GABRIEL PINHEIRO DE OLIVEIRA

CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO: O PROCESSO,
CAUSAS E TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Aprovada em: 12 / 01 / 2026 .

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Helder Pontes Gomes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Fernando José Guimarães Ferreira
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Robson Vieira da Cunha
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho aos meus pais,
amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre esteve presente em minha trajetória, concedendo-me forças, sabedoria e discernimento para evoluir como ser humano e profissional a cada dia. Sua notória presença, manifestada nos mínimos detalhes do dia a dia, é essencial para que eu mantenha a fé, os sonhos e a determinação ao longo desta caminhada.

Agradeço, de forma especial, à minha base familiar — Maria Aldeisa (mãe), Adail Rodrigues (pai), Zilma Pinheiro (madrinha) e Lourimar Pinheiro (padrinho) —, que sempre me ofereceu valores sólidos, apoio e incentivo constante para enfrentar os desafios da vida. Toda conquista alcançada só foi possível graças à presença e ao suporte dessas pessoas, que representam, para mim, um dos mais fortes instrumentos de Deus.

Estendo meus agradecimentos à minha família, em geral, que sempre contribuiu para que eu me sentisse capaz de superar obstáculos e seguir adiante. A sintonia familiar foi, sem dúvida, um fator determinante durante todo o processo.

Aos amigos pessoais, incluindo aqueles oriundos da turma e dos estágios que se tornaram amizades duradouras, agradeço pela colaboração, incentivo e companheirismo ao longo dessa jornada. Destaco, de maneira especial, meu amigo irmão Hélio Barroso, a quem Deus utilizou como instrumento para minha inserção neste curso e para demonstrar, de forma clara, Sua presença também nas relações de amizade.

Aos colegas de turma, com quem compartilhei cinco anos de curso, conhecimentos e experiências, deixo meu agradecimento pela convivência acadêmica e pela contribuição recíproca, que certamente se estenderá ao cenário profissional.

Aos professores, manifesto minha gratidão pelo profissionalismo, dedicação, comprometimento e inspiração transmitidos ao longo da formação acadêmica, contribuindo não apenas para o desenvolvimento técnico, mas também humano. Destaco um agradecimento especial ao professor Dr. Hélder Pontes Gomes, pela orientação, disponibilidade e diretrizes fundamentais para a realização desta pesquisa.

Agradeço, ainda, aos supervisores de estágio, que, com paciência e dedicação, possibilitaram meu contato direto com o mercado de trabalho e me capacitaram a resolver problemas reais. Em especial, ao engenheiro Daniel Britto, responsável por despertar em mim o interesse pela engenharia diagnóstica, linha de pesquisa deste

trabalho, bem como aos engenheiros Giordany Camarço e Mhário Eugênio, que compartilharam valiosas experiências profissionais no setor público.

Por fim, registro minha gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, participaram da minha trajetória — dos cargos menos remunerados aos mais remunerados. Ainda que, de forma breve ou imperceptível, cada uma delas contribuiu positivamente para a construção deste caminho.

O que prevemos raramente ocorre; o que
menos esperamos geralmente acontece.

Benjamin Disraeli

RESUMO

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado constitui um dos principais mecanismos de degradação, afetando diretamente a durabilidade, a segurança e a vida útil das construções. Este trabalho apresenta uma análise dos mecanismos eletroquímicos de corrosão, abordando os processos de despassivação consequente da carbonatação e da ação de íons cloreto, bem como seus efeitos estruturais. Analisa-se as consequências estruturais e econômicas associadas à corrosão, como fissuração do cobrimento, perda de aderência aço-concreto, redução da seção resistente e aumento dos custos de reparo e manutenção. Ademais, são discutidos os fatores determinantes para o avanço da corrosão, incluindo propriedades do concreto, relação água/cimento, condições de cura, presença de fissuras e variáveis ambientais. Além disso, o estudo contempla as principais técnicas de diagnóstico e monitoramento, como a determinação da resistência mecânica do concreto, profundidade de carbonatação, resistividade elétrica, identificação de cloretos no concreto, análise de potencial de corrosão e resistência à polarização linear. Logo, também aborda-se as principais estratégias de mitigação e reabilitação, destacando-se técnicas eletroquímicas (proteção catódica, dessalinização e realcalinização), uso de inibidores e aplicação de revestimentos metálicos e não metálicos. Por fim, verificou-se que a corrosão é resultado da interação entre fatores ambientais, físico-químico e construtivos; impacta diretamente no comportamento estrutural do concreto armado e gera prejuízo econômicos; a carbonatação está relacionada a fatores que condicionam a permeabilidade do concreto; os íons cloretos são os agentes mais agressivos, causando corrosão intensa e localizada; técnicas de diagnósticos são imprescindíveis para a elaboração de uma boa estratégia de mitigação e, concluiu-se que o plano de reabilitação é estabelecido de acordo com as especificidades de cada caso.

Palavras-chave: corrosão; concreto armado; carbonatação; cloretos; proteção catódica.

ABSTRACT

The corrosion of reinforcing steel in reinforced concrete structures constitutes one of the main degradation mechanisms, directly affecting the durability, safety, and service life of constructions. This study presents an analysis of electrochemical corrosion mechanisms, addressing depassivation processes resulting from carbonation and from the action of chloride ions, as well as their structural effects. The structural and economic consequences associated with corrosion are analyzed, such as cracking of the concrete cover, loss of steel–concrete bond, reduction of the effective load-bearing cross-section, and increased repair and maintenance costs. Moreover, the determining factors for the progression of corrosion are discussed, including concrete properties, water-to-cement ratio, curing conditions, the presence of cracks, and environmental variables. The study also encompasses the main diagnostic and monitoring techniques, such as the determination of concrete mechanical strength, carbonation depth, electrical resistivity, identification of chlorides in concrete, corrosion potential analysis, and linear polarization resistance. Furthermore, the principal mitigation and rehabilitation strategies are addressed, highlighting electrochemical techniques (cathodic protection, desalination, and realkalization), the use of inhibitors, and the application of metallic and non-metallic coatings. Finally, it was verified that corrosion results from the interaction of environmental, physicochemical, and construction-related factors; directly impacts the structural behavior of reinforced concrete and generates economic losses; carbonation is related to factors that govern concrete permeability; chloride ions are the most aggressive agents, causing intense and localized corrosion; diagnostic techniques are essential for the development of effective mitigation strategies; and the rehabilitation plan is established according to the specific characteristics of each case.

Keywords: corrosion; reinforced concrete; carbonation; chlorides; cathodic protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix para o ferro: equilíbrio potencial versus pH para o sistema Fe-H ₂ O a 25°C	24
Figura 2 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado	29
Figura 3 - Formas de corrosão: (A) corrosão uniforme; (B) corrosão puntiforme; (C); corrosão intergranular; (D) corrosão transgranular.....	30
Figura 4 - Deterioração da corrosão das armaduras. (A) Penetração de agentes agressivos; (B) fissuração devido às forças de expansão dos produtos de corrosão; (C) lascamento do concreto e corrosão acentuada; e (D) redução significativa da seção da armadura	34
Figura 5 - Representação esquemática da penetração de CO ₂ por difusão e do processo de carbonatação.	37
Figura 6 - Lixiviação com formação de estalactites	38
Figura 7 - Influência da relação água/cimento na profundidade de carbonatação em concretos com 350 kg de cimento por m ³ , após três anos	39
Figura 8 - Influência do tempo de cura na profundidade de carbonatação	40
Figura 9 - Representação esquemática da carbonatação no interior da fissura	41
Figura 10 - Influência do teor de CO ₂ no coeficiente de carbonatação de concretos com diferentes relações água/cimento.....	41
Figura 11 - Influência do teor de CO ₂ no coeficiente de carbonatação de concretos com diferentes relações água/cimento.....	42
Figura 12 - Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto	44
Figura 13 - Tipos de corrosão no concreto armado e fatores que os provocam	45
Figura 14 - Ensaio de esclerometria para estimativa da dureza superficial do concreto	47
Figura 15 - Exemplo do aspecto das amostras após aspersão de fenolfatelína	48
Figura 16 - Representação esquemática do ensaio de resistividade elétrica do concreto com o equipamento Resipod Proceq.....	49
Figura 17 - Medição da profundidade de penetração de cloretos por meio da aspersão de uma solução de nitrato de prata (AgNO ₃).....	50
Figura 18 - Representação esquemática do ensaio para a realização das leituras de potencial de corrosão, utilizando o cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO ₄) com eletrodo de referência	51
Figura 19 - Circulação da corrente em um anodo de sacrifício	54
Figura 20 - Concreto armado com aplicação de proteção galvânica utilizando pastilha Z	55
Figura 21 - Proteção catódica por corrente impressa para o concreto armado utilizando tela de titânio como ânodo	56
Figura 22 - Princípio da dessalinização.....	58

Figura 23 - Representação esquemática da técnica de realcanilização de concreto 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa entre os Métodos de Proteção Catódica.....	57
Tabela 2 - Tabela comparativa entre as principais características dos métodos de proteção	60

LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1).....	28
(Equação 2).....	28
(Equação 3).....	36
(Equação 4).....	37
(Equação 5).....	37
(Equação 6).....	37
(Equação 7).....	51
(Equação 8).....	55
(Equação 9).....	55
(Equação 10).....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Sal de Friedel
Ag	Prata
AgCl	Cloreto de prata
AgNO_3	Nitrato de prata
Al_2O_3	Óxido de alumínio (alumina)
AlN	Nitreto de alumínio
B_4C	Carbeto de boro
BeO	Óxido de berílio
BN	Nitreto de boro
Br^-	Íon brometo
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
Ca^{2+}	Íon cálcio
Ca^+	Íon cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
Cl^-	Íon cloreto
CO_2	Dióxido de carbono
CO_3^{2-}	Ânion carbonato
Cr_2O_3	Óxido de cromo (III)

Cu	Cobre
CuSO ₄	Sulfato de cobre
Fe	Ferro
Fe ²⁺	Íon ferroso
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (III)
Fe ₃ O ₄	Óxido de ferro (II,III) – magnetita
FeO	Óxido de ferro (II)
Fe(OH) ₂	Hidróxido de ferro (II)
Fe(OH) ₃	Hidróxido de ferro (III)
Fe(OH) ₃ 3H ₂ O ²	Hidróxido de ferro (III) tri-hidratado
Fe-Si-Cr	Liga ferro–silício–cromo
H ₂ O	Água
I ⁻	Íon iodeto
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
K ⁺	Íon potássio
MgF ₂	Fluoreto de magnésio
MMO	Óxidos metálicos mistos
MoSi ₂	Dissiliceto de molibdênio
Na ⁺	Íon sódio
NbSi ₂	Siliceto de nióbio
NO ₂ ⁻	Íon nitrito
OH ⁻	Íon hidróxido ou hidroxila
PbSO ₄	Sulfato de chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico

SO_2	Dióxido de enxofre
ThO_2	Óxido de tório
TiB_2	Diboreto de titânio
TiC	Carboneto de titânio
UR	Umidade relativa
WC	Carbeto de tungstênio
WC-Co	Carbeto de tungstênio—cobalto
WSi_2	Dissiliceto de tungstênio
ZrB_2	Diboreto de zircônio
ZrO_2	Dióxido de zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS

$A \cdot h/m^2$	Ampère-hora por metro quadrado
A/m^2	Ampère por metro quadrado
$^{\circ}C$	Grau Celsius
L	Litro
mA/m^2	Miliampère por metro quadrado
mol	Mol
mV	Milivolt
$\Omega \cdot cm^2$	Ohm centímetro quadrado
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Contexto	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 Justificativa.....	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Concreto armado.....	23
2.2 Conceitos e tipos de corrosão	24
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Modalidade de pesquisa.....	26
3.2 Instrumentos de coleta de dados	26
3.3 Participantes da pesquisa	27
4 CORROSÃO ELETROQUÍMICA.....	28
5 CONSEQUÊNCIAS DA CORROSÃO	32
5.1 Expansão e fissuração do revestimento	32
5.2 Perda de aderência aço-concreto	32
5.3 Redução da seção útil das armaduras	33
5.4 Modificação do comportamento estrutural global	33
5.5 Consequências econômicas.....	34
6 CAUSAS DE CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO ARMADO.....	36
6.1 Carbonatação.....	36
6.1.1 Relação água/cimento.....	39
6.1.2 Tipo de cimento	39
6.1.3 Presença de adições minerais	40
6.1.4 Condições de cura	40
6.1.5 Presença de fissuras	40
6.1.6 Concentração de CO ₂	41
6.1.7 Umidade relativa do ar e grau de saturação dos poros	41
6.1.8 Temperatura	42
6.2 Ação de cloretos.....	43
7 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO	46
7.1 Técnicas de avaliação do concreto como barreira físico-química	46
7.1.1 Resistência mecânica do concreto.....	46
7.1.2 Profundidade de carbonatação	47
7.1.3 Resistividade do concreto	48

7.1.4 Identificação de presença de cloretos no concreto	49
7.2 Monitoramento e previsão da corrosão das armaduras	50
7.2.1 Potencial de corrosão.....	50
7.2.2 Resistência à polarização linear	51
8 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO E PREVENÇÃO	52
8.1 Técnicas eletroquímicas.....	52
8.1.1 Proteção catódica.....	52
8.1.2 Dessalinização	57
8.1.3 Realcalinização	58
8.2 Inibidores.....	60
8.2.1 Inibidores anódicos	60
8.2.2 Inibidores catódicos.....	61
8.2.3 Inibidores mistos	62
8.3 Revestimentos.....	63
8.3.1 Revestimentos metálicos.....	63
8.3.2 Revestimentos não metálicos.....	64
9 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	66
9.1 Consequências da corrosão	66
9.2 Carbonatação.....	67
9.3 Contaminação por cloretos.....	67
9.4 Técnicas de monitoramento e diagnóstico	67
9.5 Técnicas de mitigação.....	68
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O concreto armado é um material amplamente utilizado na engenharia civil devido à sua elevada resistência à compressão e à capacidade de trabalhar em conjunto com barras de aço, que suprem sua baixa resistência à tração.

Com o aumento do uso deste material compósito, surgiram preocupações relacionadas à corrosão das armaduras, especialmente em estruturas expostas às intempéries, submetidas a esforços mecânicos ou em contato com agentes químicos. O estudo desse fenômeno permite observar que tanto a qualidade dos materiais quanto o processo de preparo do concreto são fatores determinantes para garantir maior resistência e durabilidade às estruturas.

A corrosão eletroquímica atuante nas armaduras do concreto armado é um processo de oxirredução que ocorre quando o aço é exposto a água e oxigênio, formando uma pilha eletroquímica (ânodo e cátodo) nas armaduras inseridas no concreto, causando a deterioração do metal.

Esse processo pode levar à expansão volumétrica dos produtos de corrosão, fissuração, perda de aderência entre aço e concreto e redução da seção resistente das barras. Além disso, compromete aspectos relacionados aos custos de manutenção.

O concreto, em seu estado natural e devidamente curado, possui elevada alcalinidade, resultante dos produtos de hidratação do cimento e, por esse motivo, oferece condições de proteção às armaduras em virtude da formação de um filme passivo (estável e aderente). Entretanto, essa proteção pode ser comprometida quando agentes agressivos penetram pela matriz porosa do material e alcançam a superfície metálica, desencadeando processos eletroquímicos de corrosão. Entre esses agentes, destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), que reduz o pH por meio da carbonatação, e os íons cloreto (Cl^-), que rompem a película passiva mesmo em ambientes altamente alcalinos, provocando corrosão localizada (por pite).

Em resalta, corrosão eletroquímica trata-se de um fenômeno eletroquímico que depende da interação entre aço, eletrólito (geralmente a água intrínseca no concreto), oxigênio e diferenças de potencial entre regiões da superfície metálica. O monitoramento desses parâmetros, aliado à aplicação de técnicas adequadas de

proteção, contribui para ampliar significativamente a vida útil das estruturas.

O diagnóstico da corrosão é imprescindível para a avaliação do fenômeno e elaboração de estratégias de intervenção. As técnicas utilizadas de diagnóstico e previsão da ocorrência do processo corrosivo podem ser divididas em dois grupos: avaliação do concreto como barreira físico-química e monitoramento e previsão da corrosão. Quanto à ao estudo do concreto como barreira físico-química pode-se utilizar técnicas que avaliam a resistividade mecânica, a profundidade de carbonatação, a resistividade elétrica, o potencial de corrosão e a resistência à polarização linear. Já em relação ao monitoramento e previsão da corrosão é comum aplicar técnicas como potencial de corrosão e resistência à polarização linear.

Tendo conhecimento do estado do concreto e do nível de corrosão e deterioração das armaduras é possível estabelecer planos eficazes para a mitigação e intervenção do processo. Entre os métodos com esta finalidade estão: técnicas eletroquímicas (proteção catódica, dessalinização e realcalinização) e uso de inibidores e revestimentos.

Essa pesquisa fundamenta-se em estudos teóricos e referências consolidadas na literatura, visando fornecer uma visão integrada sobre o fenômeno da corrosão, suas causas, implicações estruturais e, principalmente, as possibilidades de prolongar a vida útil do concreto armado por meio de práticas preventivas e corretivas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma análise técnica e teórica sobre o processo de corrosão das armaduras em concreto armado, examinando seus mecanismos, causas, métodos de avaliação e técnicas de mitigação, com base na literatura científica disponível.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar os mecanismos da corrosão eletroquímica em armaduras de concreto armado.
- Discorrer sobre as consequências estruturais decorrentes da corrosão das armaduras.

- Estudar as causas mais comuns de corrosão, com ênfase na carbonatação e na ação de íons cloreto.
- Examinar técnicas de diagnóstico e monitoramento utilizadas para avaliar o estado do concreto e as características da corrosão nas armaduras.
- Explorar os principais métodos de prevenção, reparo e reabilitação disponíveis na engenharia civil.

1.3 Justificativa

A corrosão das armaduras representa um dos maiores desafios para a durabilidade das estruturas de concreto armado, afetando diretamente sua segurança, funcionalidade e vida útil. Em contextos urbanos, bem como em regiões litorâneas, o risco de despassivação das barras é elevado, tornando o tema ainda mais relevante.

Além disso, os custos associados à recuperação de estruturas deterioradas por corrosão são elevados, frequentemente superando o investimento inicial em prevenção. Assim, compreender o fenômeno torna-se essencial para elaborar métodos de prevenção e intervenção, visto que intervenções inadequadas podem comprometer ainda mais a integridade estrutural.

A escolha do tema justifica-se pelo papel crítico da corrosão na degradação de estruturas e pela necessidade crescente de estratégias eficientes de durabilidade. Nesse sentido, o estudo busca contribuir para o entendimento teórico do processo, de causas, de técnicas de diagnóstico e de soluções disponíveis para mitigar esse fenômeno.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

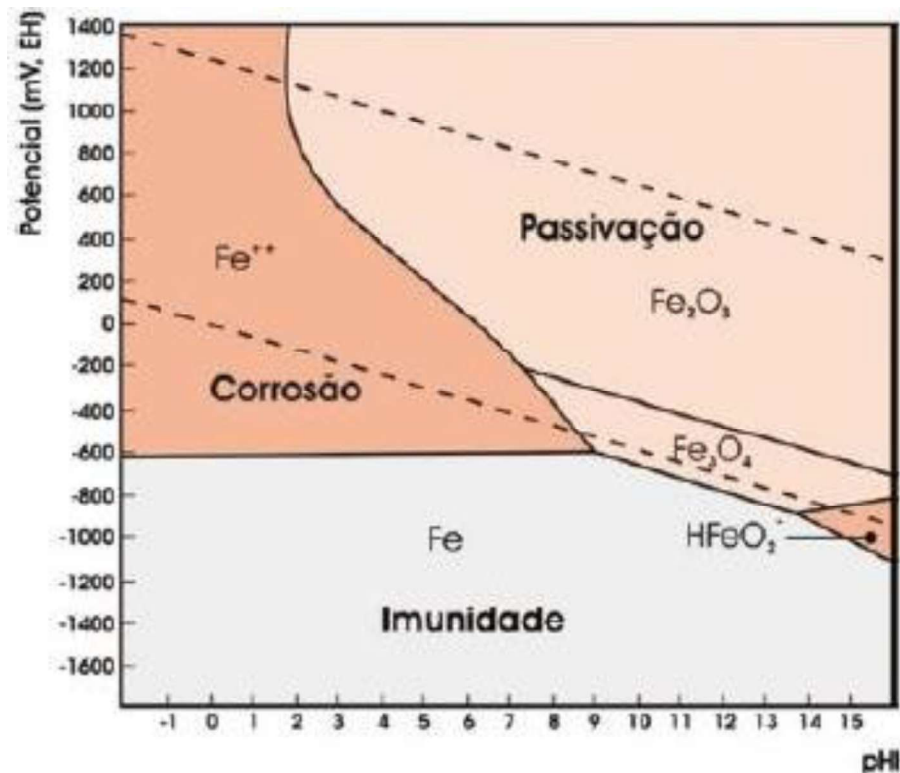
2.1 Concreto armado

O concreto, material composto por aglomerantes (cimento), agregados miúdos (areias), agregados graúdos (seixos e britas), adições minerais, aditivos (plastificantes, aceleradores, retardadores) e água, é muito utilizado na construção civil. Ele, por si só, possui uma boa resistência à compressão, mas não à tração. Logo, em virtude da necessidade de resistência a ambos os esforços, faz-se a associação do concreto com materiais resistentes à tração, como o aço, tendo com resultado o concreto armado (Porto; Fernandes, 2015).

A durabilidade desse sistema depende, diretamente, da integridade da interface aço-concreto. O concreto, quando bem projetado, executado e curado, possui uma alta alcalinidade em virtude da presença de hidróxido de cálcio, oriundo do processo de hidratação do cimento. Esse meio alcalino (pH entre 12,5 e 13,5), responsável por deixar o aço em condições passivas, ou seja, sob proteção de uma camada de óxidos estáveis formados na sua superfície (Helene, 1993). Essa película passiva desenvolve-se naturalmente quando o aço é imerso no meio altamente alcalino do concreto fresco, constituindo o principal mecanismo de proteção das armaduras em estruturas de concreto armado. De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), os óxidos e hidróxidos mais comuns na superfície do aço (dependendo da temperatura e do pH do meio) são: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}^2$.

O Diagrama de Pourbaix, apresentado na **Figura 1**, relaciona o potencial eletroquímico com o pH do meio e permite avaliar as condições que indicam ao material a imunidade, passivação ou corrosão em água pura. No diagrama do sistema $\text{Fe-H}_2\text{O}$, observa-se que para o pH entre 12,5 e 13,5 do concreto a uma temperatura de 25 °C, o ferro está em estado de imunidade (Fe) ou de passivação (Fe_2O_3 ou Fe_3O_4), que oferece proteção à armadura.

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix para o ferro: equilíbrio potencial versus pH para o sistema Fe-H₂O a 25°C



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

No entanto, quando agentes agressivos presentes na atmosfera, como dióxido de carbono (CO₂) e íons de cloreto (Cl⁻), penetram no concreto pela matriz porosa e entram em contato com a armadura, ocorre o fenômeno de despassivação, ou seja, instabilidade da película passivadora. Nesse ponto, o meio possibilita a ocorrência da reação eletroquímica denominada corrosão, dando início à deterioração do aço e comprometendo a durabilidade e segurança estrutural.

Desse modo, observa-se que a durabilidade do concreto armado não está relacionada apenas a resistências mecânicas, mas também da sua capacidade de resistir à penetração de agentes agressivos, mantendo o pH elevado (alcalinidade) e a integridade do revestimento.

2.2 Conceitos e tipos de corrosão

A corrosão pode ser conceituada, de modo geral, como um processo de deterioração de materiais, principalmente metais, causados por reações químicas ou eletroquímicas do meio ambiente, resultando em alterações prejudiciais destes.

Ademais é um problema de grande relevância na engenharia civil, comprometendo a durabilidade e segurança das estruturas, além de acarretar em grandes custos de manutenção e reabilitação destas.

A corrosão é um processo espontâneo que acontece em razão da necessidade do material em alcançar seu estado de menor energia. A maioria dos metais, inclusive o ferro, são encontrados na natureza na forma de óxidos e hidróxidos, pois é nessa forma que eles possuem o estado mínimo de energia. Esses metais, adquirem o estado metálico quando passam por processamento, no entanto, ao entrarem em contato com o meio ambiente, reagem retornando ao estado de menor energia, que é na forma de compostos (Ribeiro *et al.*, 2018).

O ferro, por exemplo, corresponde a cerca de 98% da composição do aço CA (concreto armado) e, ao reagir com o meio, transforma principalmente em óxido férrico (Fe_2O_3), a ferrugem, pois assim ele encontra-se em um estado de energia menor e mais estável que o ferro metálico.

Segundo Helene (1993), em relação a deterioração do aço, existem dois tipos de processo de corrosão que podem agir: **oxidação direta**, uma reação gás-metal onde os átomos do metal reagem diretamente com o oxigênio, formando uma película uniforme e contínua de óxido de ferro; a outra é a **corrosão eletroquímica**, resultado da formação de pilhas de corrosão devido à presença de umidade, cloretos e/ou gás carbônico (CO_2) que possam atuar como eletrólito na superfície das barras ou no concreto que a envolve.

Ambos os tipos podem reagir no aço do concreto armado. No entanto, como a oxidação não é o processo principal ocorrente em estruturas convencionais, esse estudo focará apenas na corrosão eletroquímica.

3 METODOLOGIA

O presente estudo tem como objetivo estudar o processo de corrosão de armaduras em concreto armado, analisar suas principais causas e abordar técnicas de mitigação.

3.1 Modalidade de pesquisa

Esta pesquisa será explicativa e de natureza qualitativa. De acordo com Gil (2017), a pesquisa explicativa tem como objetivo identificar os aspectos que possuem influência na ocorrência dos fenômenos, já a natureza qualitativa é uma sequência de atividades que engloba a redução, categorização e reflexão sobre os dados coletados. Desse modo, o caráter explicativo possibilita investigar as causas e relações de fatores que contribuem para o processo de corrosão, enquanto a natureza qualitativa viabiliza uma análise mais detalhada e interpretativa dos dados, com foco nos aspectos como condições ambientais, comportamentais e características técnicas.

A pesquisa adotará o método bibliográfico como principal procedimento, buscando estudar produções acadêmicas, teóricas e científicas existentes sobre o tema. Para Gil (2017), a pesquisa bibliográfica é propícia para o levantamento, análise e reflexão sobre os conceitos, metodologias e teorias já produzidas por outros autores, visando englobar diversas visões e desenvolver uma base sólida de conhecimento.

3.2 Instrumentos de coleta de dados

O principal instrumento de coleta de dados será a pesquisa bibliográfica, baseando-se em livros, artigos científicos, teses, dissertações e normas técnicas relacionadas ao tema. As bases de dados utilizadas para a revisão bibliográfica serão de relevância científica como Google Acadêmico, SciELO Brasil e Portal de Periódicos da CAPES, assegurando a confiabilidade dos materiais selecionados. Além disso, terá como referência estudos de caso e relatórios técnicos que abordem exemplos práticos de aplicação das técnicas de mitigação.

3.3 Participantes da pesquisa

Como é uma pesquisa de caráter bibliográfico e qualitativo, não haverá envolvimento direto de indivíduos como sujeitos da pesquisa. No entanto, estudiosos e autores dos quais os trabalhos serão analisados exercerão papel essencial no fornecimento de informações para o desenvolvimento de uma argumentação científica.

Por ser uma pesquisa de caráter bibliográfico, não envolverá diretamente sujeitos humanos ou animais, serão utilizados exclusivamente materiais disponíveis em bases de dados. Com isso, esta pesquisa não apresenta riscos éticos. Todavia, a legislação atual sobre direitos autorais será respeitada, com a devida citação das fontes usadas.

4 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

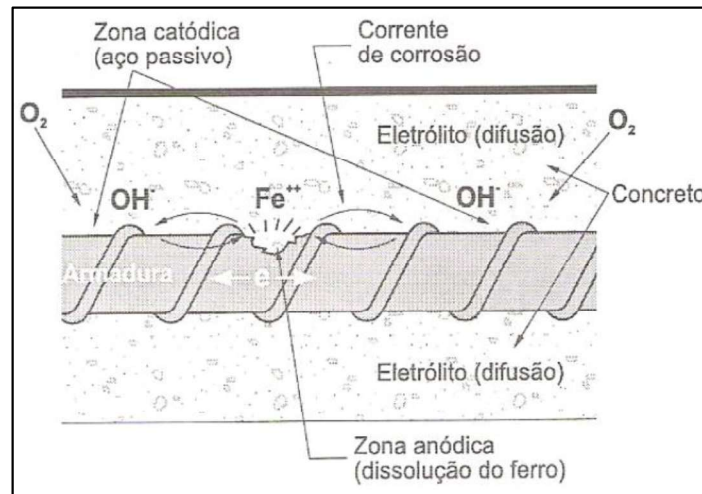
A corrosão eletroquímica é causada pela formação de uma pilha eletroquímica que ocorre em meio aquoso, onde devem estar presentes: uma zona anódica, área onde ocorre a oxidação (perda de elétrons); uma zona catódica, área que recebe os elétrons (redução) gerados na zona anódica devido à diferença de potencial de eletrodo entre elas; um eletrólito, solução iônica responsável pela condução de íons que cobre as regiões anódicas e catódicas; uma ligação elétrica que permite o fluxo da corrente elétrica entre o ânodo e o cátodo e também deve existir oxigênio para a formação do óxido de ferro.

Na zona anódica da armadura, por ser a região que possui menor potencial de redução, o ferro perde elétrons para formar íons de ferro (Fe^{2+}), ocorrendo a oxidação deste. Já na zona catódica, os agentes oxidantes presentes na atmosfera, geralmente o oxigênio e o hidrogênio, recebem os elétrons vindo do ânodo, sob reação de redução. Como exemplos de reações de oxidação e redução no concreto armado, pode-se mencionar:



Os elétrons são transportados por meio do próprio metal, que atua como eletrodo. Já os íons, que passam da zona anódica para a catódica, são conduzidos através do eletrólito, geralmente a água.

Figura 2 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado

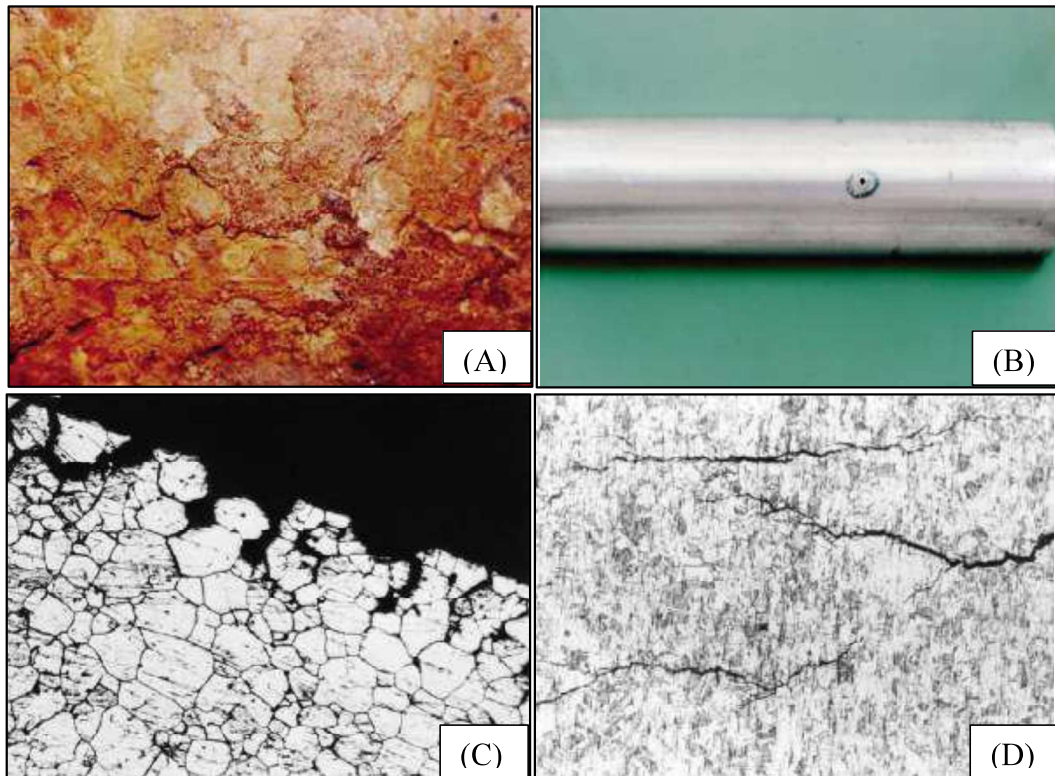


Fonte: Lodi, 2018.

As possíveis formas de corrosão eletroquímica que a armadura pode sofrer são (Ribeiro *et al.*, 2018):

- *Corrosão uniforme*: corrosão ocorre em toda a superfície da armadura, quando exposta ao meio corrosivo;
- *Corrosão puntiforme ou por pite*: o desgaste acontece de forma localizada, manifestando-se como pequenas cavidades, conhecidas como alvéolos, capaz de atacar até mesmo aços inoxidáveis. Íons halogênios (Cl^- , Br^- e I^-) são os causadores dessa forma de corrosão, sendo o íon cloreto o mais significativo em virtude da sua ampla presença na natureza.
- *Corrosão intergranular*: ocorre entre os grãos cristalinos do metal e, sob esforços de tração, podem fissurar ou fraturar, perdendo a estabilidade;
- *Corrosão transgranular*: acontece no interior dos grãos do metal e, sob esforços mecânicos, podem fraturar a estrutura.

Figura 3 - Formas de corrosão: (A) corrosão uniforme; (B) corrosão puntiforme; (C); corrosão intergranular; (D) corrosão transgranular.



Fonte: Gentil, 2007.

Em resumo, na corrosão eletroquímica, a movimentação de elétrons no aço acontece partindo da zona anódica para a zona catódica, formando um circuito elétrico por meio de um eletrólito. Ademais, o aço corroído se expande, podendo gerar tensões internas no concreto, causando trincamento e desagregação e acelerando o processo de corrosão a partir da facilitação de entrada de mais água, oxigênio e agentes agressivos.

Para Helene (1993), os tipos de células ou pilhas eletroquímicas que podem atuar no concreto armado são as seguintes:

- *Célula de aeração diferencial*: decorrente da diferença de acesso de oxigênio entre as regiões circunvizinhas da armadura. Nessa reação, o eletrodo é o metal Fe, que passa à solução liberando elétrons e formando óxido de ferro;
- *Célula de concentração salina diferencial*: resultado de diferentes concentrações de sais na solução intersticial, ou seja, nos poros capilares e nas fissuras do concreto;
- *Célula de tensão diferencial*: deve-se à diferença de tensões nas inúmeras partes de uma mesma barra;

- *Célula de temperatura diferencial*: efeito da diferença de temperatura entre as regiões próximas da mesma barra ou de barras conectadas por estribos ou soldas;
- *Célula imposta*: resultante da ação de correntes elétricas externas à estrutura.

5 CONSEQUÊNCIAS DA CORROSÃO

A corrosão das armaduras é um dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado, produzindo efeitos em diferentes escalas, do nível microestrutural do concreto até o comportamento global do elemento estrutural. Esse processo altera propriedades físicas, químicas e mecânicas do conjunto aço-concreto, resultando em fissuração, perda de aderência, redução da seção de aço e consequente diminuição da capacidade resistente e da vida útil do sistema. Segundo diversos autores, a corrosão pode comprometer não apenas o desempenho estrutural, mas também aspectos relacionados aos custos de manutenção, sendo um problema de grande relevância na engenharia civil moderna (Helene, 1993; Mehta; Monteiro, 2014).

5.1 Expansão e fissuração do cobrimento

O processo de corrosão das armaduras gera produtos de corrosão com volume significativamente maior que o volume original do aço metálico. Essa expansão provoca tensões internas no cobrimento, que é a região do concreto responsável por proteger as barras contra aos agentes agressivos.

À medida que os óxidos se acumulam, ocorre aumento da pressão radial sobre o concreto, ultrapassando a resistência à tração do material e desencadeando fissuras longitudinais ao longo das barras. Essas fissuras tendem a se propagar para a superfície, formando aberturas visíveis e permitindo maior penetração de agentes como oxigênio, dióxido de carbono e íons cloro, acelerando ainda mais o processo corrosivo.

Portanto, a corrosão causa a fissuração do cobrimento, que tem como uma função fundamental garantir a durabilidade da armadura. Uma vez que se rompe a barreira física do concreto, cria-se um ciclo de alimentação da deterioração.

5.2 Perda de aderência aço-concreto

A corrosão altera significativamente a aderência entre o aço e o concreto. Os produtos de corrosão, além de serem volumosos, são frágeis e não garantem a transmissão eficiente de tensões entre materiais. Segundo Helene (1993), a aderência

depende da combinação entre aderência química, atrito e engrenamento mecânico; porém, com a corrosão, esses mecanismos são prejudicados.

A fissuração longitudinal causada pela expansão dos óxidos interrompe o confinamento do concreto ao redor da barra, reduzindo sua capacidade de resistir às tensões de cisalhamento transferidas do aço para o concreto. O resultado é uma menor ancoragem e o deslizamento prematuro das barras sob carregamentos estruturais.

Em resumo, com a perda de aderência, a estrutura passa a apresentar deformações excessivas, instabilidade na fissuração e redução da rigidez. Em casos severos, pode ocorrer até mesmo o arrancamento da barra, tornando o comportamento do elemento incompatível com as hipóteses estabelecidas em projeto.

5.3 Redução da seção útil das armaduras

A corrosão eletroquímica provoca perda progressiva da seção transversal das barras de aço. Esse fenômeno é particularmente crítico porque compromete diretamente a resistência última das armaduras, reduzindo a capacidade de resistir aos esforços solicitantes.

Além da diminuição da área resistente, a corrosão pode gerar entalhes e seções irregulares, atuando como pontos de concentração de tensões que aceleram a ruptura do aço sob carregamento (Bastos, 2019). Quando o processo alcança níveis avançados, as barras podem perder continuidade, apresentar fraturas superficiais ou até mesmo ruptura frágil.

A redução da seção também implica diminuição da capacidade de deformação plástica, o que prejudica o comportamento dúctil desejado em elementos de concreto armado.

5.4 Modificação do comportamento estrutural global

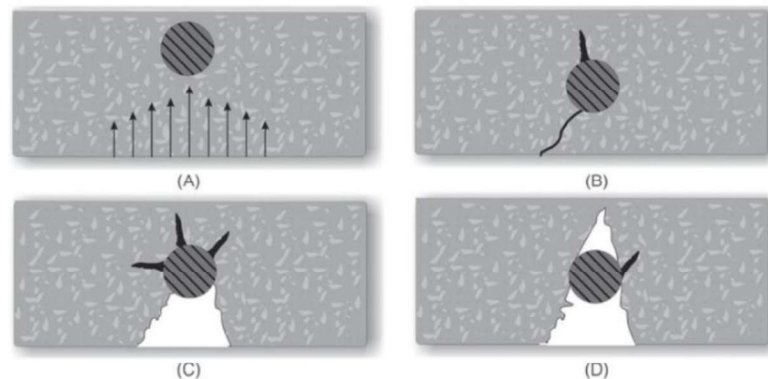
Em conjunto, fissuração do cobrimento, perda de aderência e diminuição da área das armaduras alteram significativamente o comportamento estrutural dos elementos de concreto armado. Estruturas que inicialmente atendiam aos critérios de rigidez, resistência e durabilidade passam a apresentar desempenho inferior, podendo comprometer estados limites de serviço e últimos.

Entre as principais modificações podem ser destacadas:

- Aumento da fissuração e perda de controle da largura das fissuras;
- aumento das flechas e deformações devido à menor trabalhabilidade conjunta do sistema aço-concreto;
- redução da capacidade de absorção de esforços, prejudicando a ductilidade;
- rupturas prematuras por perda de ancoragem ou ruptura frágil da armadura;
- alteração da distribuição de esforços, já que barras corroídas podem deixar de atuar integralmente na seção.

Conforme discutido por Helene (1993), o comportamento estrutural pode deixar de ser previsível com o avanço da corrosão, levando o elemento a estados de risco que não foram previstos durante o dimensionamento original.

Figura 4 - Deterioração da corrosão das armaduras. (A) Penetração de agentes agressivos; (B) fissuração devido às forças de expansão dos produtos de corrosão; (C) lascamento do concreto e corrosão acentuada; e (D) redução significativa da seção da armadura



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

5.5 Consequências econômicas

Os impactos da corrosão ultrapassam o campo técnico e atingem diretamente fatores econômicos e sociais. Estruturas com corrosão avançada demandam intervenções corretivas frequentemente dispendiosas, como recomposição de cobertura, substituição de armaduras, aumento de seção ou reforços estruturais.

Além dos custos diretos, há impactos indiretos, como interrupções de uso, perda de produtividade, danos a equipamentos e prejuízos associados à desvalorização imobiliária. Em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos e edificações públicas, esses custos podem atingir valores de grande magnitude.

Assim, a corrosão deve ser tratada como um fenômeno de alto impacto econômico e risco potencial à segurança pública, justificando a adoção de estratégias preventivas e de gestão da durabilidade ao longo da vida útil da estrutura.

6 CAUSAS DE CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO ARMADO

Para evitar as consequências mencionadas, é imprescindível entender sobre as causas do problema.

Compreender os mecanismos e fatores que contribuem para a corrosão de armaduras em concreto armado é essencial para elaborar planos de mitigação. Este estudo focará no processo de carbonatação do concreto e na ação de íons cloreto, pois estes são os contribuintes mais comuns para a ocorrência da corrosão.

6.1 Carbonatação

Gases como gás carbônico (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e gás sulfúrico (H_2S), presentes na atmosfera, ao entrar em contato com o concreto, podem reduzir o pH da solução existente em seus poros.

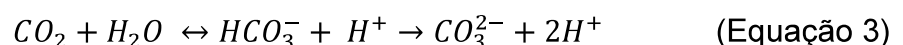
O concreto possui uma alta alcalinidade, principalmente, pela presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente da hidratação do cimento. Logo, em contato com os gases citados essa alcalinidade pode ser reduzida. Onde, principalmente, o CO_2 , age transformando os compostos em carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme representado na **Equação 6**. Esse processo é chamado de carbonatação. O CO_2 deposita-se no concreto por meio do processo de difusão.

Difusão é o processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração. A difusão é um processo espontâneo de transporte de massa por efeito de gradientes de concentração, proporcionado por dois diferentes meios em contato íntimo por meio dos quais a substância se difunde para igualar as concentrações (RIBEIRO *et al.*, 2018, p. 60).

Então, com a ocorrência desse mecanismo o pH que antes era 12,5 – 13,5 passa a ser inferior a 9,4, que é o pH de precipitação do CaCO_3 , causando a instabilidade da camada passivadora do aço (Helene, 1993).

Um estudo feito por Ribeiro *et al.* (2018) mostra que a carbonatação está vinculada às seguintes etapas:

- Difusão do CO_2 para o interior do concreto (**Equação 3**):



- A dissolução do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) nos poros do cimento disponibiliza íons Ca^{2+} e OH^- (**Equação 4**) e, a seguir, há a reação do CO_3^{2-} com o Ca^{2+} , originando o carbonato de cálcio (**Equação 5**):



- Reação do CO_2 (dióxido de carbono) com o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), formando o CaCO_3 (carbonato de cálcio) e originando o processo de carbonatação, conforme demonstrado na **Equação 6**:

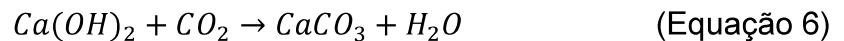
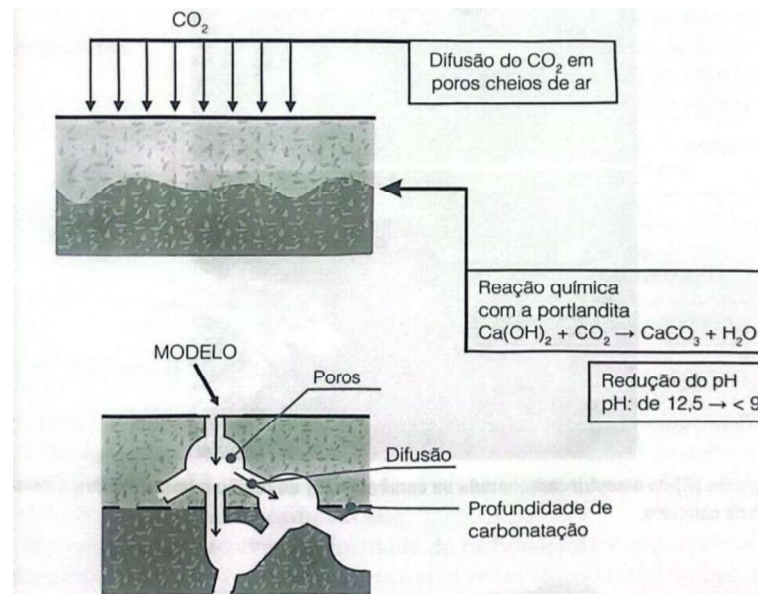


Figura 5 - Representação esquemática da penetração de CO_2 por difusão e do processo de carbonatação.



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

A carbonatação não atua diretamente no processo corrosivo, mas contribui significativamente para a degradação do concreto.

Um exemplo bastante comum associado ao processo de carbonatação é a eflorescência, identificada pela formação de depósitos esbranquiçados na superfície do concreto. Esse fenômeno ocorre quando a água, contendo pequenas quantidades de sais de cálcio e magnésio, solubiliza o Ca(OH)_2 presente na matriz cimentícia, promovendo sua degradação. O hidróxido de cálcio lixiviado reage então com o CO_2 , originando carbonato de cálcio insolúvel. Em algumas situações, esse acúmulo manifesta-se na forma de pequenas estalactites, vide **Figura 6**. Quando a lixiviação é mais intensa, o concreto gradualmente se torna mais poroso, resultando em camadas mais espessas de carbonato de cálcio (Silva; Oliveira, 2011).

Figura 6 - Lixiviação com formação de estalactites



Fonte: Gentil, 2007.

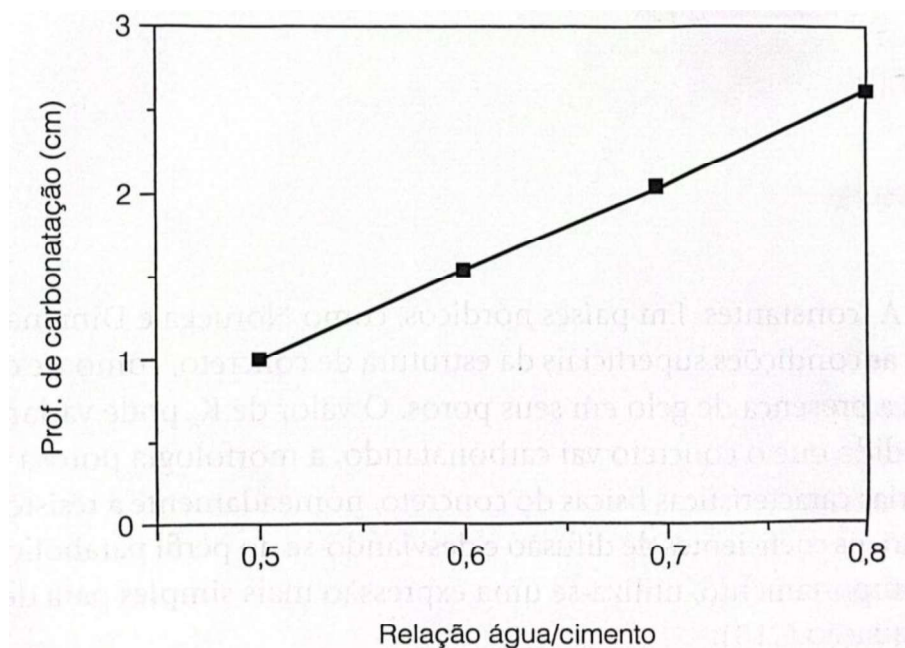
Curiosamente, apesar de ser normalmente associada à deterioração, a carbonatação também apresenta um efeito benéfico limitado. A formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) nos poros do concreto contribui para o aumento da densidade, reduzindo temporariamente a permeabilidade e tornando o concreto mais compacto. Esse efeito é notável em concretos não armados ou em estruturas onde a profundidade de carbonatação não atinge as armaduras. Entretanto, essa característica benéfica é restrita, pois a perda de alcalinidade e o risco de corrosão superam essa vantagem em estruturas armadas, que é o foco desse trabalho.

A velocidade e profundidade da carbonatação são influenciadas tanto pela qualidade do concreto endurecido quanto pelas condições do ambiente. Esse trabalho analisa brevemente fatores como relação água/cimento, tipo de cimento, presença de adições minerais, condições de cura, presença de fissuras, concentração de CO_2 , umidade relativa do ar e grau de saturação e temperatura.

6.1.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento está diretamente relacionada com a porosidade do concreto, então é natural que tenha grande influência na velocidade de carbonatação. Relações a/c elevadas resultam em concretos mais porosos e permeáveis, favorecendo a difusão do dióxido de carbono (CO_2) pelos poros e, conseqüentemente, acelerando o avanço da frente de carbonatação. Já concretos com baixa relação a/c apresentam matriz mais densa e menos conectada, dificultando a penetração dos gases. Por meio do estudo de Ribeiro *et al.* (2018), observa-se que a profundidade de carbonatação de concretos com relações água/cimento iguais a 0,80, 0,60 e 0,45, em média, encontra-se na relação 4:2:1, conforme a **Figura 7**. Em termos práticos, concretos com a/c inferiores a 0,45 apresentam boa resistência à carbonatação, desde que sejam bem curados (Kulakowski, 2002).

Figura 7 - Influência da relação água/cimento na profundidade de carbonatação em concretos com 350 kg de cimento por m^3 , após três anos



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

6.1.2 Tipo de cimento

O teor de cimento influencia diretamente na quantidade de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) disponível para reagir com o dióxido de carbono (CO_2). Logo, concretos com baixo consumo de cimento tendem a carbonatar mais rapidamente devido à

menor reserva alcalina.

Em comparação com cimentos Portland puros, cimentos com adições pozolânicas possuem menor resistência à carbonatação em virtude da diminuição da reserva alcalina provocada pela reação pozolânica (Ribeiro *et al.*, 2008).

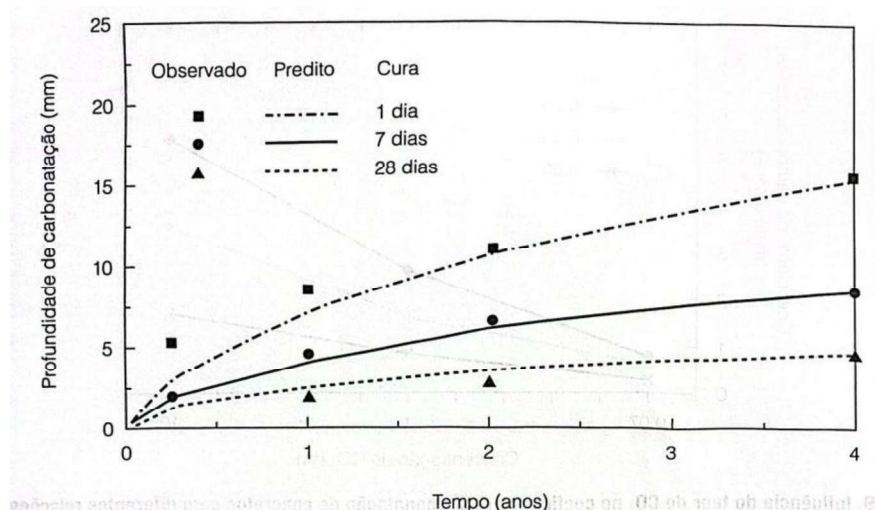
6.1.3 Presença de adições minerais

As adições minerais como sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória de alto-forno alteram a microestrutura do concreto. Essas adições de natureza pozolânica reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reduzindo a porosidade do material e aumentando a densidade da matriz. Em contrapartida, diminuem a reserva alcalina, mas isso pode ser minimizado com uma cura adequada (Ribeiro *et al.*, 2018; Mehta; Monteiro, 2014).

6.1.4 Condições de cura

Quanto maior o tempo de cura, maior será o nível de hidratação do cimento, reduzindo a porosidade e permeabilidade e dificultando a carbonatação do concreto.

Figura 8 - Influência do tempo de cura na profundidade de carbonatação



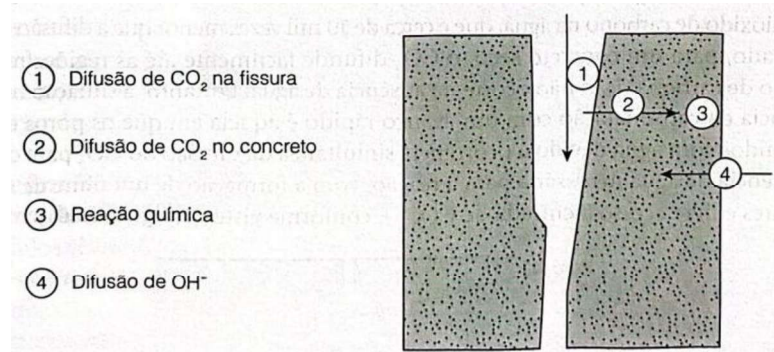
Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

6.1.5 Presença de fissuras

A existência de fissuras facilita a penetração do CO_2 para o interior do concreto,

resultando no aumento da taxa de carbonatação.

Figura 9 - Representação esquemática da carbonatação no interior da fissura

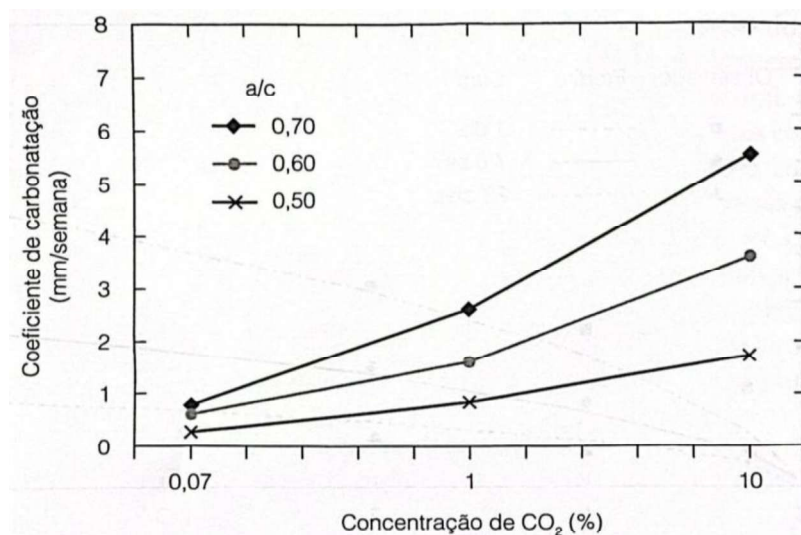


Fonte: Ribeiro *et al.* (2018).

6.1.6 Concentração de CO_2

O gás carbônico é um reagente essencial para o processo de carbonatação, portanto, em ambientes com maior concentração de CO_2 , a velocidade da carbonatação intensifica, sobretudo, em concretos com altas relações água/cimento.

Figura 10 - Influência do teor de CO_2 no coeficiente de carbonatação de concretos com diferentes relações água/cimento



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

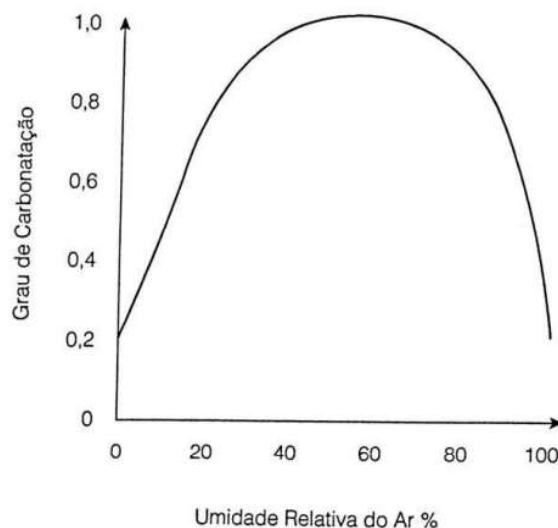
6.1.7 Umidade relativa do ar e grau de saturação dos poros

A umidade relativa do ar e o grau de saturação dos poros condicionam a taxa

de difusão do gás carbônico (CO_2). Desse modo:

- Poros completamente secos: o CO_2 difunde facilmente até as partes mais internas, entretanto, em razão da ausência de água, não ocorre carbonatação;
- Poros completamente saturados com água: devido à baixa difusibilidade do CO_2 na água, a penetração deste é quase inexistente;
- Poros parcialmente preenchidos: a frente de carbonatação progride ligeiramente em virtude da simultaneidade da existência de água e da viabilidade de difusão do CO_2 . Portanto, considera-se que a condição mais favorável para maiores velocidades de carbonatação é com uma UR entre 50 e 65% (Ribeiro *et al.*, 2018).

Figura 11 - Influência do teor de CO_2 no coeficiente de carbonatação de concretos com diferentes relações água/cimento



Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

6.1.8 Temperatura

Temperaturas mais comuns encontradas (entre 20 e 40°C) são pouco influentes no processo de carbonatação, onde em ambientes com essas temperaturas o principal controlador é a difusão. Entretanto, quando a umidade interna do concreto e do meio entram em equilíbrio, a umidade e a temperatura influenciarão na existência de vapor ou na saturação dos poros, tornando-se influente na taxa de carbonatação (Ribeiro *et al.*, 2018).

6.2 Ação de cloretos

Os cloretos podem estar presentes no concreto tanto por meio de componentes na mistura, como água, aditivos e agregados, quanto por penetração externa mediante a rede de poros, como ocorre em ambientes marinhos (Comim *et al.*, 2017). Os íons cloreto atuam na corrosão como eletrólito forte, aumentando a condutividade que, por sua vez é um mecanismo eletroquímico fundamental no processo. Os íons cloreto condicionam velocidades de corrosão intensas e perigosas, sendo uma das principais causas de corrosão localizada, conhecida como corrosão por pite, podendo comprometer a superfície da armadura por completa, levando a estrutura à ruína (Franco, 2011; Araújo *et al.*, 2016).

Os cloretos podem penetrar no concreto por diferentes mecanismos, sendo eles: absorção capilar, penetração por migração e difusão iônica (Cascudo, 1997).

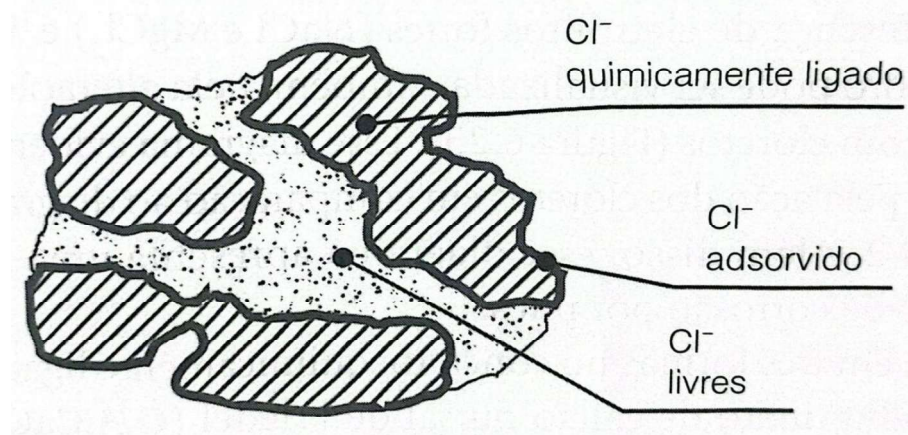
A absorção capilar é um mecanismo dependente da porosidade. Logo, quanto menor for o diâmetro dos poros capilares, maior será a pressão e a profundidade da penetração de água no concreto. Logicamente, quanto maior for a seção dos poros, menor será a intensidade das forças de sucção (Helene, 1993). A porosidade do concreto está diretamente associada à sua composição e condições de cura, pois quanto maior for o grau de hidratação do material, menor será sua permeabilidade (Andrade, 2001).

De acordo com Helene (1993), a penetração de cloretos por migração se dá pela ação de um campo elétrico semelhante ao gerado pelas células eletroquímicas. Ademais, Andrade (2001) afirma que a diferença de potencial causada por pequenas cargas elétricas (correntes de fuga) é o suficiente para gerar este campo elétrico.

O último mecanismo de transporte é a difusão iônica, que ocorre em virtude de gradientes de concentração iônica, sendo entre ambiente externo o interior do concreto ou dentro do próprio concreto (Comim *et al.*, 2017).

Depois de penetrados no concreto, parte dos cloretos fica quimicamente ligada a compostos com aluminatos (C_3A e C_4AF) formando sal de Friedel ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), parte é adsorvida na superfície dos poros e outra parte fica livre para interagir em processos corrosivos. Sempre haverá íons livres, pois o equilíbrio entre essas três formas é predominante. Os cloretos livres são a preocupação (Ribeiro *et al.*, 2018).

Figura 12 - Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto

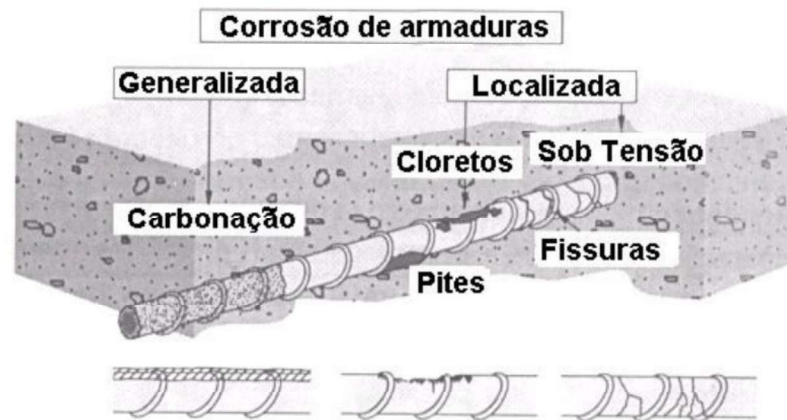


Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018.

Silva e Oliveira (2011) defendem, com base no relatório do American Concrete Institute – ACI (2001), que existem 3 teorias modernas que explicam o efeito dos íons cloreto na corrosão:

- *Teoria da adsorção*: em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila, os íons cloreto são adsorvidos na superfície metálica. O cloreto promove a hidratação dos íons metálicos, favorecendo sua dissolução.
- *Teoria do filme óxido*: os íons cloreto penetram no filme de óxido passivante que recobre o aço com maior facilidade do que outros íons, como o sulfato (SO_4^{2-}), seja por meio de poros ou defeitos, seja por dispersão coloidal. Dessa forma, os íons cloro reduzem a tensão superficial interfacial, promovendo a formação de rupturas e falhas que comprometem a integridade do filme passivo.
- *Teoria de complexo transitório*: os íons Cl^- competem com os íons hidroxila (OH^-) na formação de íons ferrosos, originando um complexo solúvel de cloreto de ferro. Este pode difundir-se a partir das regiões anódicas, degradando a camada protetora de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) e permitindo a continuidade do processo corrosivo. A certa distância do eletrodo, o complexo é rompido, precipitando o hidróxido de ferro e liberando novamente os íons cloreto, que retornam para transportar mais íons ferrosos das zonas anódicas. Como a corrosão não é interrompida, novos íons de ferro continuam a migrar pelo concreto a partir do ponto de corrosão e reagem com o oxigênio, formando óxidos de ferro que ocupam um volume aproximadamente quatro vezes maior, gerando tensões internas e fissuras no concreto.

Figura 13 - Tipos de corrosão no concreto armado e fatores que os provocam



Fonte: Fernandes; Brito, 2002 (segundo Cascudo, 1997).

7 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO

A corrosão no concreto armado é um processo “camuflado”, isto é, quando os primeiros sintomas vêm a aparecer, o fenômeno já tem iniciado e propagado a bastante tempo. Sendo assim, sua identificação precoce é muito difícil.

O diagnóstico da corrosão é imprescindível para a avaliação da durabilidade e a escolha de técnicas de reabilitação. Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para a avaliação e estudo da corrosão, entre as mais utilizadas estão as técnicas eletroquímicas.

A armadura do concreto pode ser protegida tanto por barreira física (camada de recobrimento), quanto por ação química (alteração dos valores do pH do concreto). Para este trabalho, foram selecionadas técnicas de monitoramento divididas em dois grupos: avaliação do concreto como barreira físico-química e monitoramento e previsão da corrosão das armaduras.

7.1 Técnicas de avaliação do concreto como barreira físico-química

O concreto, se bem projetado, executado e curado, já funciona como uma barreira natural contra a ocorrência da corrosão. A sua qualidade quanto a microestrutura ou condutividade permite a previsão de patologias.

Nesse grupo, o trabalho discorrerá sobre técnicas que avaliarão profundidade de carbonatação e resistividade do concreto.

7.1.1 Resistência mecânica do concreto

Este ensaio pode ser realizado por meio da determinação da dureza superficial do concreto, considerando-se que há uma forte correlação entre essa propriedade e a resistência à compressão do material. Também pode ser executado por métodos ultrassônicos, que se baseiam na medição da velocidade de propagação de ondas longitudinais através do concreto, assumindo que o material apresenta comportamento homogêneo para ondas elásticas de alta frequência. Assim, em frequências mais baixas, o concreto tende a apresentar maior heterogeneidade.

Equívocos nessa avaliação podem surgir em razão da carbonatação superficial, que endurece mais a camada externa do concreto do que a interna, podendo resultar

em uma interpretação imprecisa da resistência.

Figura 14 - Ensaio de esclerometria para estimativa da dureza superficial do concreto



Fonte: Loxxi, 2025.

7.1.2 Profundidade de carbonatação

Sendo um dos mais simples ensaios para investigar fenômenos que favorecem a corrosão, esse teste mede a profundidade em que o pH do concreto sofreu redução devido à reação de CO_2 com produtos da hidratação do cimento, causando a carbonatação.

Esse ensaio permite avaliar se a frente de carbonatação tem atingido ou está próxima das armaduras, indicando risco de despassivação do aço.

Para a realização desse ensaio são utilizados indicadores à base de fenolftaleína (1% da solução), que indicam mudança de pH entre 8 e 11. Para pH igual ou superior 9,5, a fenolftaleína apresenta coloração róseo-avermelhada e para valores inferiores é incolor.

Em geral, para obter esses resultados a solução alcóolica de fenolftaleína a 1% é borrifada na superfície de fratura.

Figura 15 - Exemplo do aspecto das amostras após aspersão de fenolfatelina



Fonte: Ferreira *et al.*, 2019.

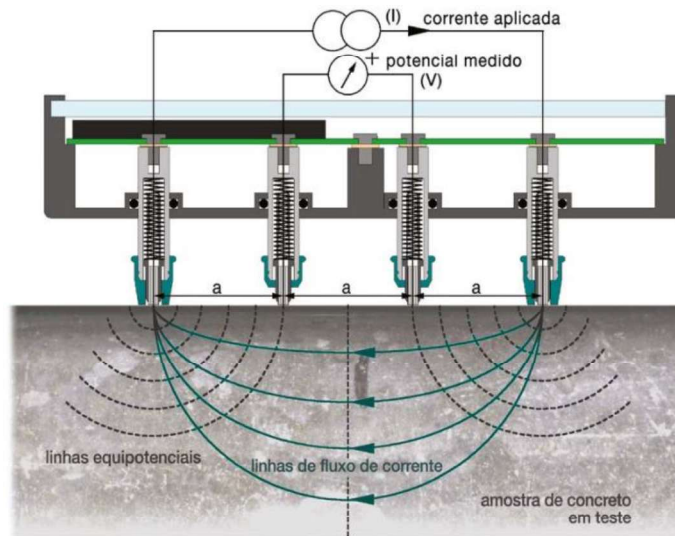
7.1.3 Resistividade do concreto

A resistividade elétrica do concreto é caracterizada pela sua resistência à passagem de corrente elétrica por meio da movimentação iônica em seus poros.

Esse teste é muito utilizado por ser não destrutivo e por ser monitorado externamente, com eletrodos embutidos. Ele mede maior ou menor facilidade com que uma corrente elétrica atravessa o concreto. Ele estima a probabilidade de corrosão das armaduras, pois resistividade baixa favorece a propagação de correntes galvânicas e a corrosão eletroquímica. Além disso, uma baixa resistividade pode significar contaminação por sais e/ou maior quantidade de água retida nos poros do material (Ribeiro *et al.*, 2018).

Para a realizar esse ensaio utiliza-se o método dos “quatro pontos” (Wenner), desenvolvido pelo físico Frank Wenner, em 1915, no qual, posiciona-se quatro eletrodos equidistantes na superfície do concreto, aplica-se corrente entre os dois externos e mede-se a tensão entre os internos e, no final, obtém-se a resistividade elétrica pela relação entre a tensão medida e a corrente aplicada.

Figura 16 - Representação esquemática do ensaio de resistividade elétrica do concreto com o equipamento Resipod Proceq



Fonte: Proceq.

7.1.4 Identificação de presença de cloretos no concreto

Para identificar a presença de cloretos no concreto e sua profundidade de penetração, é comum utilizar o ensaio com solução de nitrato de prata (AgNO_3). Essa técnica consiste em fazer um corte no concreto e aplicar uma solução de AgNO_3 (aproximadamente 0,1 mol/L) na superfície fresca. Os íons de prata reagem com os cloretos gerando variações de cor: áreas contaminadas apresentam coloração esbranquiçada em razão da formação de cloreto de prata (AgCl), enquanto áreas isentas de cloretos exibem coloração amarronzada ou acinzentada.

Este ensaio, de caráter qualitativo, possui grande importância, principalmente em áreas litorâneas, onde possui elevada concentração de cloretos no ar e na água, favorecendo o risco de aceleração do processo corrosivo.

Figura 17 - Medição da profundidade de penetração de cloretos por meio da aspersão de uma solução de nitrato de prata (AgNO_3)



Fonte: Marcondes, 2012.

7.2 Monitoramento e previsão da corrosão das armaduras

Uma vez que a barreira de proteção físico-química formada pelo concreto é rompida parcial ou totalmente, o acesso de agentes agressivos à armadura é facilitado. Desse modo, para manter controle sobre a situação, faz-se necessário o monitoramento do processo corrosivo.

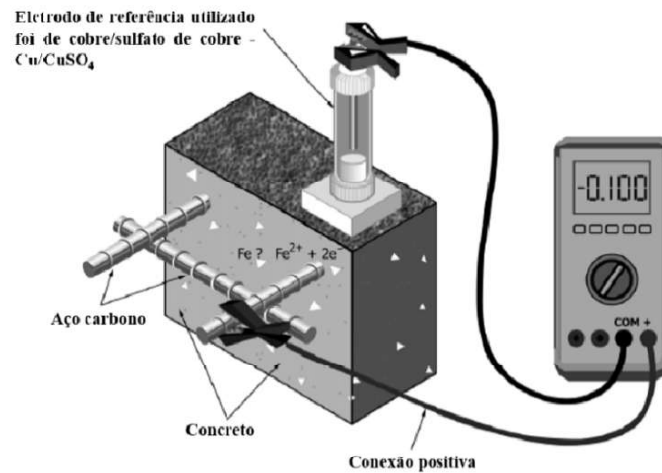
Nesse grupo o trabalho abordará os seguintes ensaios: potencial de corrosão e resistência à polarização linear.

7.2.1 Potencial de corrosão

Prático e não destrutivo, esse ensaio fornece indicação aproximada do estado de corrosão ou de passividade da armadura. Baseia-se na determinação de uma diferença de potencial elétrico entre o aço e um eletrodo referência posicionado na superfície do concreto.

Entretanto, essa técnica avalia apenas as probabilidades da ocorrência da corrosão, não fornece informações sobre a evolução do processo. Portanto, isoladamente, é um método insuficiente e deve estar acompanhada de alguma técnica que determina, de forma quantitativa, a cinética de corrosão do aço.

Figura 18 - Representação esquemática do ensaio para a realização das leituras de potencial de corrosão, utilizando o cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) com eletrodo de referência



Fonte: Godinho, Medeiros, 2019.

7.2.2 Resistência à polarização linear

Tendo em vista que uma das deficiências do ensaio de potencial de corrosão é a falta de informações quantitativas em relação à cinética da corrosão, a resistência à polarização linear é, possivelmente, a técnica mais utilizada para monitorar o processo corrosivo nas armaduras do concreto armado, medindo a velocidade da corrosão e estimando a perda de massa da armadura em um determinado intervalo de tempo.

Essa técnica consiste em aplicar uma pequena polarização em torno do potencial de corrosão natural da armadura e medir a corrente resultante. A relação entre a variação de potencial e a corrente medida resulta na resistência de polarização, e, a partir dela, torna-se possível estimar a taxa de corrosão do aço, pela equação de Stern-Geary (Equação 7).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- I_{corr} = taxa de corrosão
- R_p = resistência à polarização ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
- B = constante de Stern-Geary (aproximadamente 26 mV para corrosão ativa e 52 mV para corrosão passiva)

8 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO E PREVENÇÃO

A corrosão das armaduras é uma das principais causas de degradação de estruturas de concreto armado, resultando em perda de seção do aço, fissuração e destacamento do cobrimento, redução da capacidade resistente e diminuição da vida útil da estrutura. Entretanto, tendo conhecimento dos fatores contribuintes para o processo e do diagnóstico, é possível elaborar estratégias de prevenção e reabilitação eficazes, eficientes e viáveis.

Entre as mais utilizadas, destacam-se as técnicas eletroquímicas, como proteção catódica, dessalinização e realcaninização e o uso de inibidores de corrosão e revestimentos, aplicados tanto no concreto quanto diretamente nas armaduras. A seguir, são discutidos cada um desses métodos.

8.1 Técnicas eletroquímicas

Diante da corrosão de armaduras, é necessário ter conhecimento das causas e da extensão da deterioração para tornar-se capaz de elaborar estratégias eficazes e eficientes de intervenção.

Além de reparação localizada, onde ocorre a substituição do material contaminado, em corrosão envolvendo a contaminação do concreto por cloretos, os métodos mais utilizados para a reabilitação são os eletroquímicos, como a proteção catódica e a dessalinização (extração de cloretos). Já em estruturas carbonatadas, a técnica mais comum é a realcalinização.

Essas soluções utilizando processo eletroquímico costumam ser mais eficazes. A proteção catódica tem como objetivo reduzir o processo corrosivo durante toda a vida útil da estrutura como a aplicação de uma corrente contínua externa, enquanto a dessalinização e a realcalinização objetivam remover os agentes agressivos através da aplicação temporária de um campo elétrico.

8.1.1 Proteção catódica

A proteção catódica é uma das técnicas mais empregadas mundialmente para prevenir ou desacelerar a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos, especialmente em meios contendo íons cloreto,

como regiões marítimas e áreas industriais contaminadas. Esse método consiste na aplicação de uma corrente contínua entre um eletrodo (ânodo) exposto ao ambiente e o metal a ser protegido (cátodo). Em resumo, o princípio fundamental baseia-se em transformar a armadura, originalmente suscetível à corrosão, em um eletrodo de caráter catódico por meio da modificação do potencial eletroquímico da barra de aço. Ao reduzir suficientemente o potencial da armadura, impede-se que esta funcione como ânodo, eliminando ou minimizando o processo corrosivo.

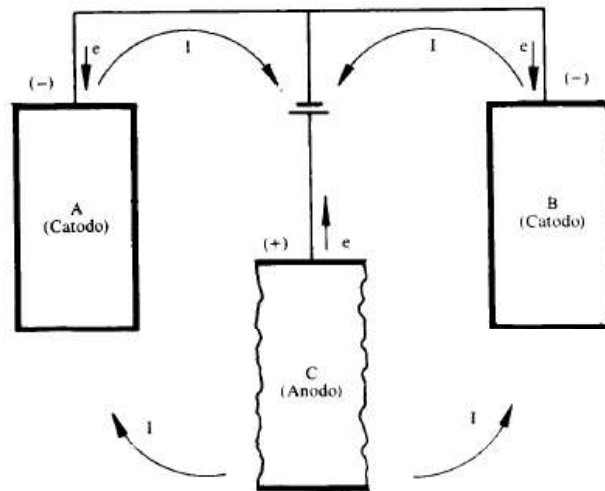
Em estruturas contaminadas por cloretos é indicado baixar o potencial para a zona de passivação perfeita do diagrama de Pourbaix (**Figura 1**). Já em estruturas novas é suficiente fornecer corrente para manter o potencial de proteção na zona de passivação imperfeita.

Logo, existem dois métodos principais de proteção catódica aplicáveis ao concreto armado: a proteção catódica galvânica (ou por ânodos de sacrifício) e a proteção catódica por corrente impressa. Ambos se baseiam nos mesmos princípios eletroquímicos, mas se diferenciam quanto à fonte de energia, aos materiais utilizados e ao nível de controle e eficiência oferecido ao sistema.

A) Proteção catódica galvânica

A proteção catódica galvânica, também conhecida como proteção por ânodos de sacrifício, utiliza metais mais reativos que o aço, normalmente ligas de zinco, de magnésio ou de alumínio, conectados eletricamente às armaduras. Esses metais possuem potencial eletroquímico mais negativo e, ao serem acoplados ao aço, passam a atuar como ânodos, corroendo-se preferencialmente e fornecendo elétrons à armadura. Dessa forma, o aço permanece protegido, funcionando como cátodo.

Figura 19 - Circulação da corrente em um anodo de sacrifício



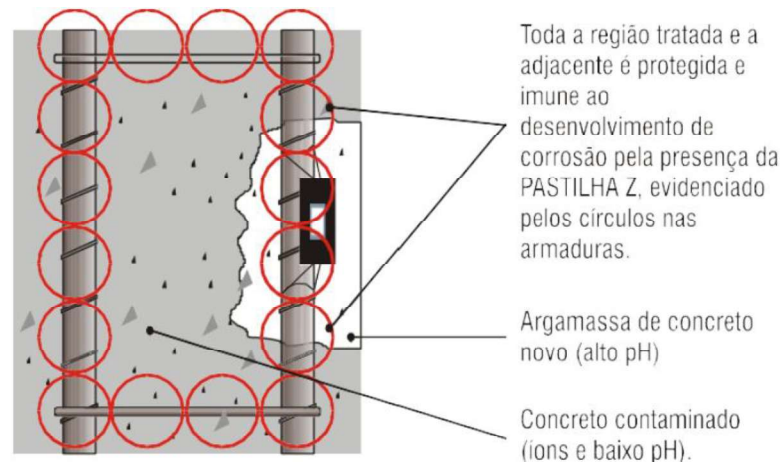
Fonte: Gentil, 2007.

Esse tipo de proteção precisa de cuidados constantes, pois o ânodo pode se desgastar mais rápido em ambientes agressivos, diminuindo a eficácia da proteção com o passar do tempo. Como a corrente iônica flui do ânodo para o cátodo (armaduras) por meio do concreto, a sua resistividade possui grande influência na eficácia do processo. Por esse motivo, para esse método atingir um bom resultado, é necessário que o concreto não tenha uma resistividade elevada, para não impor resistência à passagem da corrente. Com isso, é possível afirmar que os sistemas galvânicos apresentam desempenho reduzido em concretos com resistividade muito elevada e dificuldade para proteger grandes áreas ou estruturas com altos níveis de cloretos.

Apesar dessas restrições, a proteção galvânica é amplamente utilizada em reparos localizados, em estruturas marítimas, pilares de pontes e pavimentos, proporcionando um prolongamento significativo da vida útil da estrutura quando corretamente projetada e monitorada.

Dentre as principais vantagens dessa técnica, destacam-se: simplicidade de instalação, ausência de necessidade de fontes de energia externas, baixa manutenção, operação autônoma e contínua e menor risco de sobreproteção em relação aos sistemas de corrente impressa.

Figura 20 - Concreto armado com aplicação de proteção galvânica utilizando pastilha z

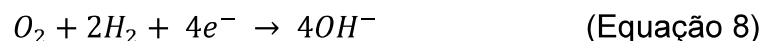


Fonte: Rogertec, 2025.

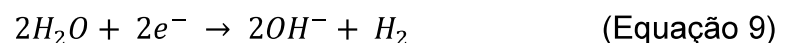
B) Proteção catódica por corrente impressa

Na proteção catódica por corrente impressa (ICCP - *Impressed Current Cathodic Protection*) utiliza-se uma fonte externa de alimentação, como um retificador, para fornecer corrente contínua aos ânodos e, a partir deles, às armaduras. Diferentemente dos sistemas galvânicos, a corrente impressa permite ajuste fino e controle do nível de proteção, podendo atender estruturas de grandes dimensões ou com alta demanda de corrente devido à elevada concentração de agentes agressivos.

Além de inverter o processo da corrosão, as reações na interface ânodo-concreto e armadura/concreto resultam em alteração química do composto. A principal é a redução de oxigênio e íons hidróxido (**Equação 8**):



Por outro lado, se o potencial do aço ficar muito negativo pode ocasionar, além da formação de íons hidróxido, a liberação de hidrogênio (**Equação 9**):



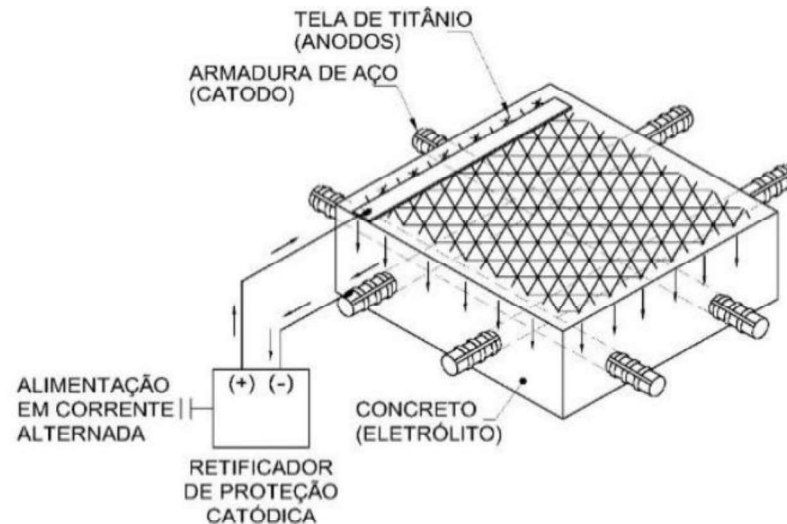
A geração de íons hidróxido favorece o aumento da alcalinidade e restauração do filme passivo. Entretanto, a liberação de hidrogênio causa a fragilização do metal em razão da penetração de hidrogênio atômico no metal. Portanto, a aplicação de

proteção catódica no concreto armado deve ser implementada com cuidado, para que não afete negativamente a qualidade do aço e do concreto.

Ribeiro *et al.* (2018) afirma que para estruturas contaminadas por cloretos, a densidade de corrente a ser aplicada é entre 2 e 20 mA/m² e para estruturas não contaminadas, submersa ou enterradas é suficiente valores entre 0,2 e 2 mA/m².

Os ânodos utilizados nesses sistemas geralmente são compostos por materiais inertes ou com alta durabilidade. Os tipos mais utilizados são de titânio revestido com óxidos metálicos mistos (MMO), ligas de Fe-Si-Cr ou grafite, pois são comprovadamente inertes na condição de processo.

Figura 21 - Proteção catódica por corrente impressa para o concreto armado utilizando tela de titânio como ânodo



Fonte: Gomes, 2021.

A principal vantagem do sistema de corrente impressa é a capacidade de controlar o potencial eletroquímico das armaduras por meio de instrumentação específica, como eletrodos de referência, normalmente eletrodos de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) ou cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄). Esse controle possibilita o ajuste preciso da corrente para assegurar a proteção sem causar sobrepolarização excessiva, que poderia gerar efeitos indesejáveis como evolução de hidrogênio (Ribeiro *et al.*, 2018).

Apesar da alta eficiência, esse sistema apresenta algumas desvantagens, como necessidade de instalação mais complexa, custo inicial elevado, dependência de fonte de energia elétrica, necessidade de monitoramento e manutenção periódica e risco de falha caso haja interrupção do fornecimento de energia.

Por essas razões, a proteção catódica por corrente impressa é especialmente recomendada para estruturas críticas, de grande importância estratégica ou altamente expostas, como plataformas marítimas, pontes estaiadas, tanques de armazenamento e grandes fachadas sujeitas a atmosfera marinha.

Tabela 1 - Tabela comparativa entre os Métodos de Proteção Catódica

Sistema Galvânico	Sistema por Corrente Impressa
Não requer fonte externa de corrente elétrica	Requer fonte externa de corrente elétrica
Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica de até 5A	Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica acima de 5A
Manutenção mais simples	Manutenção mais cara
Necessita de acompanhamento operacional	Necessita de acompanhamento operacional
Somente para eletrólito de muito baixa resistividade elétrica, em geral até 3000Ω	Pode ser usado em eletrólitos com qualquer valor de resistividade elétrica, inclusive os de muito baixa resistividade
Não apresenta problemas de interferência com estruturas estranhas	Pode apresentar problemas de interferência com estruturas estranhas
Não admite regulagem, ou admite regulagem precária	Pode ser regulado com facilidade

Fonte: Adaptado de Silva; Oliveira, 2011 (Segundo Gentil, 2007).

8.1.2 Dessalinização

A dessalinização, também conhecida como extração eletroquímica de cloretos, é um método eletroquímico temporário usado para remover íons cloreto do concreto. Essa técnica utiliza uma corrente elétrica contínua entre as armaduras do concreto (cátodo) e um ânodo colocado na superfície do elemento, embebido em um eletrólito. O processo envolve fenômenos físico-químicos como eletrólise, eletromigração iônica e eletrosmose, sendo a eletrólise e a eletromigração os mecanismos mais relevantes.

O tratamento reduz a razão Cl^-/OH^- na interface aço-concreto, atenuando a corrosão. Na eletrólise, formam-se íons hidróxido (OH^-) junto às armaduras, o que gera um ambiente alcalino, que favorece a repassivação do aço. Na eletromigração, os íons cloreto (Cl^-) migram em direção ao ânodo externo, enquanto íons sódio (Na^+), potássio (K^+) e cálcio (Ca^+) são atraídos para o cátodo. Dessa forma, os cloretos se afastam da interface aço-concreto e podem até ser removidos do concreto. A migração de metais alcalinos para a região das armaduras ajuda a preservar a alcalinidade local

após o tratamento.

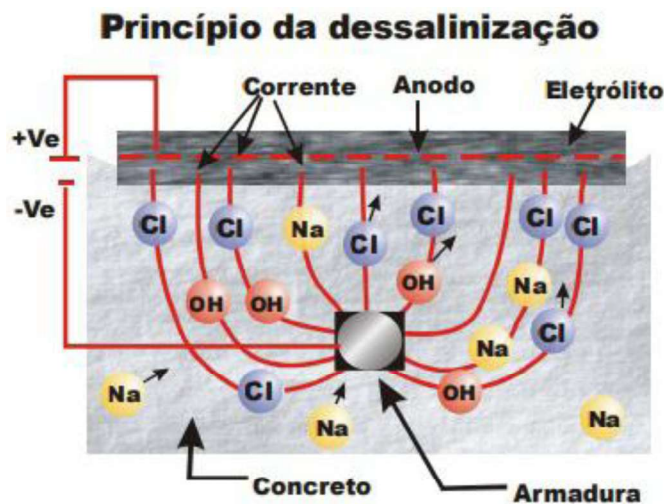
A densidade de corrente varia de 0,5 a 2 A/m², com duração típica de quatro a sete semanas, a depender de fatores como concentração e origem dos cloretos, qualidade do concreto, geometria do elemento e distribuição das armaduras (Ribeiro *et al.*, 2018).

Os ânodos podem ser de titânio ativado (não consumível) ou aço carbono (consumível). O eletrólito mais comum é a água, podendo ser substituída por soluções alcalinas caso o pH diminua. Um suporte como manta de feltro mantém o eletrólito junto ao concreto.

Segundo Ribeiro (2018), o fim do tratamento é definido pelo teor de cloretos no concreto (entre 0,2 e 0,4% em relação à massa de cimento), pela quantidade de carga por unidade de área (entre 600 e 1.500 A·h/m²) ou pela razão Cl⁻/OH⁻ (menor que 0,6).

Todavia, essa técnica possui algumas limitações, como o risco de fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência e possibilidade de intensificação de reações álcali-agregado, exigindo estudos prévios em concretos suscetíveis.

Figura 22 - Princípio da dessalinização



Fonte: Polito, 2016.

8.1.3 Realcalinização

A realcalinização é um método eletroquímico semelhante à dessalinização, porém voltado a restabelecer a alcalinidade de concretos contaminados ou carbonatados. O processo também utiliza corrente elétrica contínua aplicada entre a

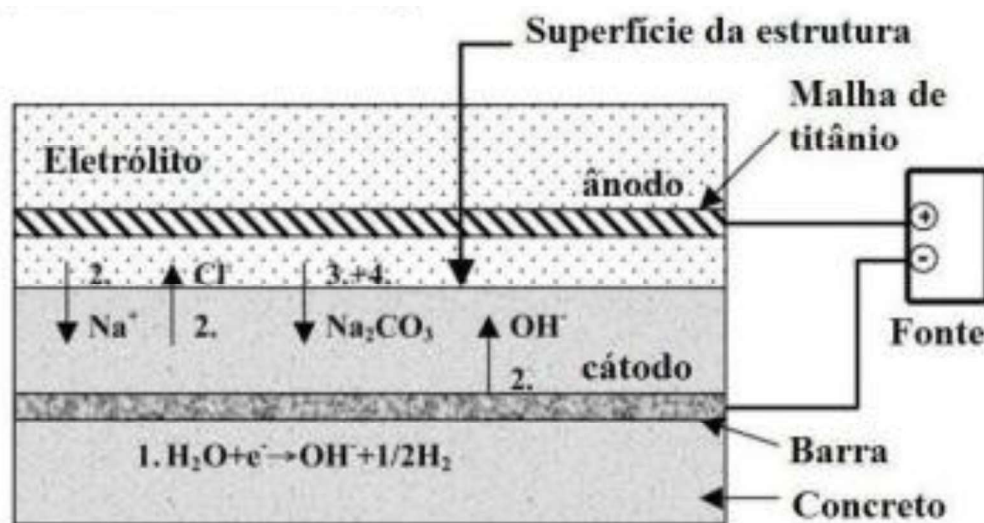
armadura (cátodo) e uma malha metálica externa (ânodo), envolta em um eletrólito alcalino. Assim como na dessalinização, diversos processos físico-químicos ocorrem simultaneamente, incluindo a formação de íons OH^- na superfície das armaduras, a migração do eletrólito para o interior do concreto e o aumento do pH na região próxima às barras para valores acima de 13,5.

As densidades de corrente são similares às da dessalinização (entre 0,5 e 2 A/m^2) e o tratamento dura de dias a semanas, dependendo da profundidade de carbonatação. A carga total requerida é da ordem de 40 a 200 $\text{A}\cdot\text{h/m}^2$ (Ribeiro *et al.*, 2018).

Os ânodos são os mesmos utilizados na dessalinização, entretanto, devido a um menor tempo de tratamento, é mais adequado a utilização de malha de aço em razão da menor probabilidade de ser completamente consumida. Já como eletrólito, as soluções utilizadas geralmente contêm metais alcalinos, como carbonato de sódio, e o sistema também requer um suporte para manter o eletrólito em contato com a superfície.

O término do processo é determinado pela medição do pH com soluções a base de fenolftaleína em corpos de prova. Após o tratamento, o circuito é interrompido e a superfície é limpa. As limitações são semelhantes às da dessalinização, com restrições em concretos com agregados potencialmente reativos.

Figura 23 - Representação esquemática da técnica de realcanilização de concreto



Fonte: Réus *et al.*, 2015.

Tabela 2 - Tabela comparativa entre as principais características dos métodos de proteção

Características	Proteção Catódica	Dessalinização	Realcalinização
Detém a corrosão por	Polarização das armaduras até o potencial de imunidade	Eliminação dos agentes agressivos	Restauração da alcalinidade perdida no entorno da armadura
Duração do tratamento	Permanente	4 a 7 semanas	1 a 2 semanas
Densidade de corrente típica	0,2 a 20 mA/m ²	0,5 a 2 A/m ²	0,5 a 2 A/m ²

Fonte: Adaptado de Silva; Oliveira, 2011 (Segundo Monteiro, 2005).

8.2 Inibidores

Os inibidores de corrosão são produtos químicos que quando presentes em concentração adequada, são capazes de reduzir ou eliminar as reações eletroquímicas que levam à corrosão das armaduras do concreto armado (Gentil, 2007). Em geral, esses compostos podem ser incorporados ao concreto fresco (prevenção), aplicados como tratamento superficial ou utilizados em reparos localizados.

No contexto da corrosão das armaduras, os inibidores são geralmente divididos em anódicos, catódicos ou mistos, conforme o mecanismo predominante de atuação. Segundo Ribeiro *et al.* (2018), os inibidores utilizados no concreto ainda podem ser classificados como:

- De absorção, quer sejam anódicos, catódicos ou mistos.
- De formação de filme passivo.
- De passivação, beneficiando a estabilidade da camada passivadora.

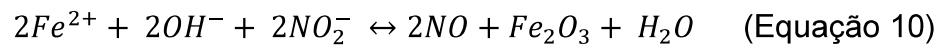
8.2.1 Inibidores anódicos

Os inibidores anódicos atuam especificamente na reação de dissolução do ferro, reduzindo a taxa de oxidação da armadura. Em estruturas de concreto, essa classe de inibidores tem como principal função reforçar ou restabelecer a camada passiva natural do aço, formada durante a hidratação do cimento devido ao pH elevado da solução intersticial.

Quando adicionados ao concreto, os inibidores anódicos reagem com o ferro, formando camadas de óxido compactas, densas e estáveis, que reduzem o fluxo de íons metálicos para a solução dos poros. Isso diminui o número de sítios anódicos ativos, retardando o início da corrosão. No entanto, sua eficiência é altamente dependente da concentração: dosagens insuficientes podem resultar em uma corrosão localizada onde a camada passiva não for formada, acelerando a corrosão.

Os inibidores anódicos mais comuns são:

- Nitrito de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$): inibidor anódico mais utilizado. Em contato com a armadura, o nitrito acelera a formação de um filme passivo de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, aderente e protetor:



Sua eficácia depende de um valor crítico entre a concentração de cloretos e a concentração de nitritos ($\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$), que, de acordo com um estudo mencionado por Ribeiro *et al.* (2018), essa eficácia é atingida se a razão for inferior a 1,0;

- Orto-fosfatos: esse tipo de inibidor aumenta a alcalinidade da água, favorecendo a formação de camadas passivadoras. No entanto, sua eficiência depende da presença de quantidade adequada de cálcio na água.
- Silicatos: atuam pela formação de ânions coloidais, resultantes da hidrólise em soluções aquosas que migram para as regiões anódicas.
- Cromatos: em alguns casos, esses compostos oxidam parcialmente os produtos da corrosão, formando substâncias menos solúveis. Apesar de sua boa eficiência de proteção, seu uso foi reduzido devido aos impactos ambientais associados.

8.2.2 Inibidores catódicos

Os inibidores catódicos atuam principalmente na redução da reação catódica, que envolve o consumo de oxigênio ou água com formação de íons hidróxido. Em concreto, isso ocorre tipicamente pela diminuição de íons agressivos ou pela criação de barreiras superficiais nas regiões catódicas (Gentil, 2007).

Ao serem adicionados ao concreto, os inibidores catódicos adsorvem-se preferencialmente sobre áreas catódicas da armadura, reduzindo sua atividade

eletroquímica. Em alguns casos, promovem a formação de compósitos insolúveis que bloqueiam a difusão de oxigênio ou aumentam o pH próximo ao aço, diminuindo a taxa de corrosão.

Esses inibidores são classificados como não-perigosos, pois, mesmo quando utilizados em concentrações abaixo da crítica, não promovem corrosão em regiões do ânodo, diferentemente do que ocorre com os inibidores anódicos.

Os inibidores catódicos mais comuns são:

- Sulfato de zinco: reagem com hidróxidos para formar depósitos insolúveis sobre zonas catódicas, reduzindo a área disponível para a reação;
- Inibidores orgânicos à base de aminas e alcanolaminas: atuam principalmente por adsorção, criando uma barreira física sobre a superfície do aço e dificultando a reação catódica. Além disso remove sujeiras como produtos de corrosão, proporcionando o contato direto da camada protetora com o aço.

Esses inibidores apresentam limitações de uso em concretos, já que os sulfatos tendem a formar sais expansivos que geram tensões internas e levam ao aparecimento de trincas (Gentil, 2007). Por esse motivo, os inibidores catódicos são menos eficientes que os anódicos no uso em concretos.

8.2.3 Inibidores mistos

Os inibidores mistos são substâncias capazes de atuar simultaneamente sobre as reações anódicas e catódicas. Essa categoria tem ganhado espaço principalmente em aplicações de reabilitação, devido à sua versatilidade e ao fato de que sua ação não depende exclusivamente da concentração em um único eletrodo. Desta forma, tem-se um efeito maior do que a soma dos efeitos individuais dos inibidores catódicos e anódicos (Silva; Oliveira, 2011).

Esses inibidores formam filmes adsorvidos sobre a superfície metálica, reduzindo a área ativa tanto para oxidação do ferro quanto para a redução do oxigênio. As películas de proteção formadas são influenciadas por diversos fatores, tais como velocidade do fluido, volume e concentração do inibidor, temperatura, tipo de substrato, tempo de contato entre inibidor e a superfície metálica e composição do fluido (Gentil, 2007).

8.3 Revestimentos

Os revestimentos funcionam barreiras físicas aplicadas no concreto ou na armadura para limitar a entrada de agentes agressivos ou para isolar eletroquimicamente o aço. Eles dividem-se em metálicos e não metálicos, e estes últimos em inorgânicos e orgânicos.

8.3.1 Revestimentos metálicos

Dentre os diversos propósitos dos revestimentos metálicos, está a resistência à corrosão, que é o foco principal desta etapa do trabalho.

De acordo com Gentil (2007), o mecanismo de proteção promovido por revestimentos metálicos pode ocorrer por diferentes formas:

- Formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, pela reação com oxidantes do meio corrosivo (como alumínio, cromo e zinco);
- Os metais utilizados nos revestimentos apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, sendo esse o motivo de serem mais resistentes ao ataque ácido em meios não aerados (como chumbo, zinco e cádmio).

É importante que a superfície esteja isenta de sujeira para que tenha uma boa aderência entre o revestimento e a superfície a ser protegida. De acordo com Gentil (2007) e Silva e Oliveira (2011), os revestimentos metálicos podem atuar de duas formas distintas: catódicos e anódicos.

Os revestimentos catódicos, em relação ao material que protegem, devem ser totalmente isentos de falhas. Isso porque, na presença de eletrólitos, ocorre a formação de uma pilha galvânica, provocando corrosão acelerada do metal base, especialmente quando há uma pequena área anódica exposta associada a uma grande área catódica. Como exemplos de revestimentos catódicos para o aço-carbono, pode-se mencionar: estanho, cobre, níquel, chumbo, prata e aço inoxidável.

Já os revestimentos anódicos, em relação ao substrato metálico, não apresentam esse problema. Caso ocorram pequenas discontinuidades no revestimento, o próprio metal do revestimento atua como ânodo na pilha formada na presença de um eletrólito, protegendo catodicamente o material base. Entre os exemplos de revestimentos anódicos para ferro ou aço-carbono, destacam-se o zinco e o cádmio.

Revestimentos metálicos, portanto, podem oferecer não apenas proteção física, mas também proteção eletroquímica, sendo bastante empregados como barreiras iniciais em estruturas sujeitas a cloretos, umidade elevada e atmosferas industriais agressivas.

8.3.2 Revestimentos não metálicos

Além dos revestimentos metálicos, também existem os não metálicos. A principal função destes é impedir ou dificultar a penetração de agentes agressivos no concreto e na interface aço-concreto. Eles podem ser classificados em inorgânicos e orgânicos

A) Inorgânicos

Essa forma de revestimento é constituída por compostos inorgânicos, que podem ser aplicados diretamente na superfície metálica ou formados sobre ela por meio de reações químicas com o meio adequado.

Entre os mais comuns de aplicação direta na superfície das armaduras estão (Gentil, 2007):

- esmaltes vitrosos: são formulados principalmente por borossilicato de alumínio e sódio ou potássio e possuem boa resistência à maioria dos ácidos, com exceção do ácido fluorídrico;
- cimentos e porcelanas: os cimentos possuem boa durabilidade em ambientes alcalinos, e algumas formulações são desenvolvidas para resistirem à ácidos;
- óxidos (Al_2O_3 , BeO , Cr_2O_3 , ZrO_2 e ThO_2), carbetos (TiC e B_4C , WC e WC-Co), nitretos (AlN e BN), boretos (ZrB_2 e TiB_2) e silicetos (NbSi_2 , WSi_2 e MoSi_2): possuem elevada resistência à corrosão e ao desgaste em altas temperaturas.

E como revestimentos inorgânicos formados na superfície metálicas por meio de reações químicas, pode-se citar:

- formação de sulfato de chumbo (PbSO_4) pela ação de ácido sulfúrico sobre superfícies de chumbo;

- formação de fluoreto de magnésio (MgF_2) sobre ataque de ácido fluorídrico.

Nos casos dos revestimentos originados de reações na superfície, a película formada é insolúvel, aderente e quimicamente estável, promovendo proteção ao impedir o prosseguimento das reações corrosivas.

B) Orgânicos

Esse tipo de revestimento costuma ser mais utilizado na superfície do concreto, reforçando o papel deste como barreira de proteção das armaduras. Sendo um dos mais utilizados no Brasil, esse método consiste em aplicar uma camada aderente e impermeável na face externa do concreto para minimizar o ingresso de agentes (água, íons cloreto, oxigênio e gás carbônico) que desenvolvem o processo corrosivo.

É imprescindível a superfície estar isenta de sujeiras para que tenha uma boa aderência. Além disso, uma superfície regular contribui para menor tempo de adsorção da água pelo concreto.

Um estudo feito por Ribeiro *et al.* (2018) indica que revestimentos de poliuretano, epóxi e resina acrílica, além de impedirem a difusão de íons cloreto, podem retardar o início da corrosão. O de poliuretano é o que resiste melhor a ambientes contendo Cl^- .

O revestimento pode perder sua aderência à superfície do concreto quando este recebe a penetração de umidade, uma vez que não foi totalmente revestido. A evaporação da umidade retida fará com que o revestimento impermeável sofra uma pressão significativa, causando seu descolamento da superfície do concreto.

Quanto a isso, o revestimento de resina acrílica apresenta melhor desempenho, pois além de impedir o ingresso de agentes corrosivos na estrutura, permite a saída de vapor. Já os de poliuretano e epóxi não oferecem essa característica.

9 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidencia que o processo de corrosão em armaduras de concreto armado é resultado da interação entre variáveis ambientais, físico-químicas e construtivas e pode causar danos severos à estrutura.

9.1 Consequências da corrosão

As pesquisas analisadas demonstram que a corrosão impacta diretamente o comportamento estrutural do concreto armado. A expansão dos produtos de corrosão, que pode ser várias vezes superior ao volume original do aço, causa tensões internas que excedem a resistência à tração do concreto, resultando em fissuração longitudinal e destacamento do cobrimento. Essas fissuras expõem ainda mais as barras ao ambiente agressivo, acelerando o processo.

A perda de aderência entre aço e concreto também se mostrou um fator crítico, pois compromete a transferência de tensões, reduzindo a resistência à flexão, a ductilidade e a capacidade de redistribuição de esforços. Assim, estruturas hiperestáticas podem sofrer redistribuições indesejadas de cargas.

Outro ponto importante é que a corrosão impacta tanto a segurança quanto a longevidade da estrutura. Estudos indicam que até mesmo pequenas perdas na seção das barras podem gerar reduções significativas na capacidade resistente, demonstrando que intervenções preventivas e diagnósticos precoces são imprescindíveis.

Além dos danos estruturais, a corrosão das armaduras gera impactos econômicos. O avanço da corrosão aumenta substancialmente os custos de manutenção e reparo, pois exige intervenções complexas, como recomposição do concreto deteriorado, substituição das armaduras, aplicação de técnicas específicas de recuperação e até custos indiretos. Isso reduz a vida útil prevista da estrutura e eleva o custo total de operação ao longo do tempo.

A partir da revisão bibliográfica, verificou-se que dois mecanismos se destacam como principais causas: a carbonatação e a penetração de íons cloreto.

9.2 Carbonatação

Verificou-se que a carbonatação, causada pela reação entre o gás carbônico (CO_2) atmosférico e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) proveniente da hidratação do cimento, desempenha papel significativo na redução da alcalinidade do concreto, comprometendo a passivação natural do aço.

A literatura demonstra que, principalmente, fatores como relação água/cimento elevada, cura deficiente, presença de fissuras e grau de saturação dos poros aceleram significativamente o avanço da frente carbonatada, pois facilitam a penetração do CO_2 no concreto. Além disso, ambientes com umidade relativa entre 50% e 65% favorecem a difusão do CO_2 , intensificando a queda do pH e, conseqüentemente, o risco de corrosão.

9.3 Contaminação por cloretos

Quanto à contaminação por cloretos, observa-se que este é o agente mais agressivo para a armadura, sendo capaz de romper a película passivadora mesmo em ambientes altamente alcalinos. A corrosão por pite representa uma ameaça significativa, pois este ataque localizado reduz rapidamente a seção resistente da armadura e pode levar à ruína da estrutura. Os mecanismos de transporte (absorção capilar, migração e difusão) dependem fortemente da microestrutura do concreto. Sua presença está associada principalmente a regiões litorâneas e ao uso de água contaminada ou aditivos inadequados.

9.4 Técnicas de monitoramento e diagnóstico

Em relação às técnicas de diagnóstico, identificou-se que métodos que avaliam a resistência mecânica do concreto, a profundidade de carbonatação, a resistividade elétrica do concreto e a identificação de presença de cloretos fornecem informações essenciais sobre a função do concreto como barreira física na proteção do aço contra a origem do processo corrosivo. Enquanto o potencial de corrosão e a resistência polarização linear constituem técnicas essenciais para verificar o estado de passividade da armadura e estimar a taxa de corrosão, respectivamente.

Esses procedimentos são fundamentais para determinar o nível de risco,

orientar estratégias de intervenção e prever a vida útil da estrutura.

9.5 Técnicas de mitigação

A análise das técnicas de mitigação mostrou que processos eletroquímicos, como proteção catódica, dessalinização e realcalinização, apresentam eficiência significativa quando aplicados corretamente. A proteção catódica, especialmente por corrente impressa, permite controle preciso do potencial da armadura, sendo indicada para estruturas com elevada contaminação por cloretos. Já a dessalinização e a realcalinização atuam temporariamente, corrigindo condições químicas e prolongando a vida útil da estrutura.

O estudo também demonstrou que inibidores de corrosão possuem papel relevante tanto na prevenção quanto em reparos localizados, desde que aplicados em concentrações adequadas. Por fim, revestimentos metálicos e não metálicos funcionam como barreiras complementares, impedindo o contato das armaduras com agentes agressivos, reduzindo a entrada destes e auxiliando na preservação do cobrimento.

Assim, os resultados da revisão evidenciam que a corrosão das armaduras não pode ser evitada por apenas uma técnica isolada. Logo, exige abordagem integrada envolvendo qualidade do concreto, cobrimento adequado, métodos de proteção ativos e passivos e inspeções periódicas.

No conjunto, os resultados evidenciam que a durabilidade e a segurança das estruturas dependem diretamente da combinação entre materiais adequados, boas práticas construtivas, monitoramento periódico e intervenções corretivas alinhadas às especificidades de cada caso.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os processos corrosivos que ocorrem em estruturas de concreto armado, bem como possíveis técnicas de diagnóstico, prevenção e controle da corrosão e consequências estruturais e econômicas.

A partir da análise dos mecanismos, consequências, causas e técnicas de mitigação da corrosão em armaduras, observa-se que este fenômeno constitui um dos maiores desafios atuais da engenharia civil, afetando diretamente a segurança e o desempenho das estruturas de concreto armado. Sua complexidade torna a corrosão não apenas um problema técnico, mas também econômico, uma vez que ocasiona custos elevados de reparo e manutenção.

O estudo contribui para que a compreensão de que a durabilidade do concreto armado não está condicionada apenas às propriedades mecânicas do material, mas também à sua capacidade de proteger o aço ao longo do tempo. A penetração de agentes agressivos, especialmente dióxido de carbono (CO_2) e íons cloreto (Cl^-), representa o principal ponto crítico desse sistema, acelerando processos de despassivação, desencadeando reações eletroquímicas que comprometem a integridade estrutural.

Os resultados também reforçam a relevância de inspeções periódicas e técnicas de diagnóstico adequadas para monitorar o estado da estrutura. Os ensaios abordados nessa pesquisa são ferramentas fundamentais para subsidiar decisões de manutenção e reabilitação, prolongando a vida útil das estruturas e reduzindo os custos ao longo desta.

Em estruturas já comprometidas, a escolha do método de reabilitação deve considerar a severidade do ataque, o ambiente de exposição e a vida útil residual desejada. Em ambientes agressivos, o uso de armaduras especiais, inibidores de corrosão e sistemas eletroquímicos pode ser necessário para a prevenção, desde que avaliados sob o ponto de vista técnico e econômico.

Por fim, este estudo destaca a importância de integrar conhecimento teórico, técnicas de diagnóstico modernas e práticas construtivas de qualidade para garantir maior durabilidade às estruturas de concreto armado. Dessa forma, a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado continua sendo uma área que demanda investimentos e pesquisas, a fim de reduzir progressivamente os custos relacionados

à manutenção dessas estruturas.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, João Mario. **Análise do processo de recomposição em vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33669/1/vigasreforcofibracaborno.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- ANDRADE, Jairo Jose de Oliveira. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2613> . Acesso em: 18 dez. 2024.
- ARAUJO, Adriana; RIBEIRO, José Luis Serra; CARDOSO, Juliana Lopes; *et al.* **Definição e preparação de corpos de prova de concreto armado destinados a ensaios acelerados de corrosão de armaduras**. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 3, p. 41-62, dez. 2016. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/31> . Acesso em: 18 dez. 2024.
- BARBOSA, Roberta Silveira. **Estimativa do coeficiente de difusão utilizando um modelo preditivo de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos em linguagem de programação Python**. 2024. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências e Tecnologias Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2024. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/44309> . Acesso em: 10 nov. 2024.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2019. Apostila da disciplina Estruturas de Concreto I. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf> . Acesso em: 13 set. 2025.
- CALADO, Marcelo Alexandrino *et al.* A influência de pozolana na mitigação da corrosão de armaduras em compósitos cimentícios. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/178> . Acesso em: 13 set. 2025.
- CASCUDO, Oswaldo. **O Controle da Corrosão das Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. Ed. PINI, São Paulo, Ed. UFG, 1997.

237p.

COMIM, Kevin William; ESTACECHEN, Tatiana Alves Cecilio. Causas e alternativas de reparo da corrosão em armaduras para concreto armado. **Revista construindo**, v. 9, 2017. Disponível em:

<https://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/4550> . Acesso em: 18 dez. 2024.

DE LIMA JÚNIOR, Will José *et al.* Proposta de um plano de manutenção predial preventiva e corretiva Proposta de plano de manutenção predial preventiva e corretiva. **Revista Brasileira de Desenvolvimento** , v. 7, n. 11, pág. 104108-104123, 2021. Disponível em:

<https://scholar.archive.org/work/tkha3zgcunaptexgdo5sfz7xxm/access/wayback/https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/download/41229/pdf> . Acesso em: 18 dez. 2024.

DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; DE OLIVEIRA ANDRADE, Jairo José; DO LAGO HELENE, Paulo Roberto. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **Concreto: ciência e tecnologia**, 2011. Disponível em:

https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12947/2/Durabilidade_e_vida_util_das_estruturas_de_concreto.pdf . Acesso em: 19 ago. 2025.

FERNANDES FILHO, Rivaldo Lopes; BRITO FILHO, João Pereira de. Detecção de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado usando Sensoriamento Remoto. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 2, 2002, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABCM, 2002. p. 1-10. Disponível em:

<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2002/trabalhos/tema17/CPB0637.pdf> . Acesso em: 10 dez. 2024.

FERREIRA, Carina Farias; PALIGA, Charlei Marcelo; DA SILVA TORRES, Ariela. COMPORTAMENTO DO CONCRETO FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS E CO₂ NA CIDADE DE PELOTAS/RS. **REEC-Revista eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 2, p. 35-49, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/51363> . Acesso em: 09 ago. 2024.

FIGUEIREDO, Enio José Pazini. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20022025-153805/pt-br.php> . Acesso em: 20 out. 2025.

FRANCO, Allan Pablo Gomes. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. **Caruaru: FAVIP**, 2011.

FUSCO, Pércles B.; DE CONCRETO, Estruturas. Solicitações normais. **Ed. Guanabara Dois, Brasil**, 1981.

GENTIL, V. – **Corrosão** – Ed. LTC, 2007

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GODINHO, Jayson Pereira; DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. BIODETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO EXPOSTO À AGRESSIVIDADE AMBIENTAL DO REATOR UASB DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO. **Revista Técnico-Científica**, n. 21, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jayson-Godinho/publication/340929605_BIODETERIORACAO_DO_CONCRETO_ARMADO_EXPOSTO_A_AGRESSIVIDADE_AMBIENTAL_DO_REATOR_UASB_DE_UMA_ESTACAO_DE_TRATAMENTO_DE_ESGOTO_SANITARIO/links/5ea504bca6fdccd7945503cf/BIODETERIORACAO-DO-CONCRETO-ARMADO-EXPOSTO-A-AGRESSIVIDADE-AMBIENTAL-DO-REATOR-UASB-DE-UMA-ESTACAO-DE-TRATAMENTO-DE-ESGOTO-SANITARIO.pdf . Acesso em: 20 out. 2025.

GOMES, Luiz Paulo. A Utilização de Anodos de Proteção Catódica em Pontes e Estruturas de Concreto. Disponível em: http://www.abpe.org.br/trabalhos2021/ID_175.pdf . Acesso em: 20 out. 2025.

HELENE, PR do L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. **São Paulo**, v. 231, p. 14, 1993. Disponível em: https://www.academia.edu/download/44536119/TD1Paulo_Helene.pdf . Acesso em: 09 ago. 2024.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento Portland. **Isaia, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf> . Acesso em: 20 out. 2024.

INSTITUTO FEDERAL DO PIAUÍ. **Manual de normalização de trabalhos acadêmicos do IFPI**. Teresina: IFPI, 2021. Disponível em: <https://www.ifpi.edu.br/area-do-estudante/bibliotecas/ManualdeNormalizaodeTrabalhosAcademicosdoIFPI.pdf> . Acesso em: 20 dez. 2024.

JÚNIOR, Clémenceau Chiabi Saliba. Técnicas de recuperação de estruturas de concreto armado sob efeito da corrosão das armaduras. **Minas Gerais**, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/download/54225570/19_arquivo.pdf . Acesso em: 29 set. 2025.

JÚNIOR, Joaquim Júlio Almeida *et al.* Patologia em concreto armado e seus métodos de recuperação estrutural. **Revista Científica Novas Configurações– Diálogos Plurais**, v. 2, n. 1, p. 43-58, 2021. Disponível em: <http://www.dialogosplurais.periodikos.com.br/journal/dialogosplurais/article/603838d8a953957f2726ea32> . Acesso em: 29 set. 2025.

KULAKOWSKI, Marlova Piva. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3594> . Acesso em: 29 set. 2025.

LODI, Victor Hugo. A corrosão das armaduras de concreto. 2018. Disponível em: https://www.basalto.eng.br/wa_files/Corros_C3_A3o_20de_20Armaduras_20em_20Concreto-II.pdf . Acesso em: 29 set. 2025.

LOXXI Engenharia. Inspeção estrutural. *Loxxi – Especialidades*. Disponível em: <https://loxxi.com.br/especialidades/inspecao-estrutural/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

MACIEL, Raulene Wanzeler. Investigação em estruturas de concretos armado suscetíveis a deterioração por carbonatação em três ambientes distintos estudo de caso. 31f. 2022. Unicesumar - Universidade Cesumar de Maringá, 2022. Disponível em: <http://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/9323> . Acesso em: 19 ago. 2025.

MARCONDES, Carlos Gustavo Nastari. Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland-absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas. 2012. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/28958> . Acesso em: 19 ago. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTEIRO, Eliana Barreto. Reabilitação de estruturas de concreto. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1109-1125, 2005.

OLIVEIRA, Kleber Jesus de. **Estudo para determinação da resistividade elétrica do concreto utilizando corpos de prova**. 2025. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: [KleberJesusdeOliveiraCorr25.pdf](#) . Acesso em: 29 set. 2025.

PEREIRA, Ricardo Luiz; CARVALHO, Laísa Cristina. **PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO: estudo, análise e diagnóstico nas estruturas de concreto de uma construção civil recente**. -, 2020. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1414> . Acesso em: 09 ago. 2024.

POLITO, Giulliano. Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/italosalesmacedo/monografia-giulliano-polito> . Acesso em: 03 fev. 2025

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle. **Curso básico de concreto armado**. Oficina de Textos, 2015.

Proceq SA. *Resipod: equipamento para medição da resistividade superficial do concreto*. Schwerzenbach, Suíça: Proceq SA, 2017. Disponível em: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf . Acesso em: 02 dez. 2025.

REAL, L. V. *et al.* Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. **Revista Alconpat**, v. 5, n. 2, p. 151-161, 2015. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352015000200151&script=sci_arttext . Acesso em: 03 fev. 2025

RÉUS, G.; SOUZA, D.; BECKER, A.; RAIDOFER, J.; MEDEIROS, M. Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados. In: 57o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Bonito, 2015.

RIBEIRO, Daniel Vêras (coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ROGERTEC – Informações sobre anodo de sacrifício – www.rogertec.com.br – agosto de 2025.

SANTOS, MARIA LUIZA LOPES. Incidência de patologias e dureza superficial do concreto: um estudo de caso nos pilares da biblioteca central da universidade federal do Maranhão. **Brazilian Applied Science Review**, 2019. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/114912146/4565.pdf> . Acesso em: 03 fev. 2025

SARAIVA, Victor Alexandre Henrique Silva. Sistema de recuperação e reforço estrutural de concreto armado. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AGVPNV> . Acesso em: 24 set. 2024.

SILVA, Anderson Ylgner Oliveira; GODOY, Gustavo Henrique Albernaz Maia de. Fissuras não concreto armado: causas, consequências, formas de mitigação e reparos. 2022. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/5132> . Acesso em: 19 jan. 2025.

SILVA, Eduardo. Recuperação das fachadas de um edifício da Cidade do Recife/PE– Estudo de caso. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/116843061/cinpar.2022.pdf> . Acesso em 19 ago. 2025.

SILVA, Erick Gorito da; OLIVEIRA, Jéssica Christine Gonçalves de. Corrosão e proteção de estruturas em concreto armado: o estado da arte. **TCC (Graduação)- Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 2011. Disponível em: <https://pantheon.ufri.br/handle/11422/18521> . Acesso em 19 ago. 2024.

VIEIRA, D. V.; PELISSER, F.; PAULA, M. M. S.; MOHAMAD, G.; NÓBREGA, A. C. V. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado**. Revista Matéria, v. 15, n. 3, p. 431–444, 2010. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufri.br/sarra/artigos/artigo11145> . Acesso em: 03 fev. 2025.