

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DO PERFIL SUSTENTÁVEL DAS NOVAS TECNOLOGIAS EMPREGADAS
NO REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS

MARIA FERNANDA PEREIRA

JUIZ DE FORA

2025

ANÁLISE DO PERFIL SUSTENTÁVEL DAS NOVAS TECNOLOGIAS EMPREGADAS
NO REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS

MARIA FERNANDA PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Construção Civil

Orientadora: Maria Teresa Gomes Barbosa

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2025


ANÁLISE DO PERFIL SUSTENTÁVEL DAS NOVAS TECNOLOGIAS EMPREGADAS
NO REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS

MARIA FERNANDA PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.


Aprovado em:

Por:

Documento assinado digitalmente
 **MARIA TERESA GOMES BARBOSA**
Data: 18/03/2025 11:40:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof.^a Maria Teresa Gomes Barbosa, D.Sc (Orientadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Dep. de Construção Civil - Faculdade de Engenharia

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO EDUARDO POLISSENI**
Data: 18/03/2025 12:28:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Antônio Eduardo Polisseni, D.Sc (Examinador 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Dep. de Construção Civil - Faculdade de Engenharia

Documento assinado digitalmente
 **THALES DA SILVA SOARES PEREIRA**
Data: 18/03/2025 14:23:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Thales da Silva Soares Pereira (Examinador 02)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído

AGRADECIMENTOS

Chegar ao fim desta jornada acadêmica é um momento de grande realização, e não poderia deixá-lo passar sem expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.

A Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para enfrentar cada desafio ao longo do caminho.

Ao meu amado pai, Francisco, que, mesmo estando no céu, permanece vivo em minha memória e no meu coração. Seu exemplo de integridade, dedicação e profissionalismo na construção civil sempre será minha inspiração, e sei que, de alguma forma, ele esteve ao meu lado em cada conquista.

À minha família, meu porto seguro. À minha mãe, Aparecida, pelo amor incondicional e apoio incansável. Ao meu irmão, Guilherme, à minha cunhada, Carol, e à minha sobrinha, Sofia, por todo carinho e incentivo. E ao meu namorado, Willian, pelo companheirismo, paciência e por acreditar em mim nos momentos mais desafiadores.

Aos amigos e colegas de curso, que tornaram essa jornada mais especial. Em especial, ao PET Civil UFJF, pela amizade, pelo compartilhamento de conhecimento e pelo incentivo constante, que fizeram toda a diferença nessa caminhada.

À minha orientadora, Maria Teresa, por sua paciência, dedicação e ensinamentos valiosos, que foram fundamentais para a realização desta pesquisa. Sua orientação foi essencial para meu crescimento acadêmico e profissional.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, por me proporcionar uma formação de qualidade, um ambiente enriquecedor e as oportunidades que me permitiram evoluir ao longo dos anos.

E, por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, meu mais sincero e profundo agradecimento. Muito obrigada!

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.” (Marie Curie)

RESUMO

A corrosão das armaduras no concreto armado compromete a durabilidade e segurança das estruturas, tornando-se um dos principais desafios da construção civil. Este estudo analisa o perfil sustentável das novas tecnologias empregadas no reparo dessa anomalia, com foco nos aspectos ambientais, sociais e econômicos. A metodologia adotada baseia-se em uma revisão bibliográfica e análise comparativa das principais inovações tecnológicas voltadas à mitigação da corrosão, como concretos autocicatrizantes, nanotecnologia, aços inoxidáveis, aditivos inibidores de corrosão e sensores galvânicos de monitoramento. Os resultados indicam que não há uma solução única para eliminar a corrosão, sendo necessária a seleção da tecnologia mais adequada conforme o contexto da obra. Os concretos autocicatrizantes e a nanotecnologia oferecem ganhos nas propriedades mecânicas e nos serviços de manutenção preventiva, entretanto, apresentam desafios relacionados ao custo e produção já o uso de aços inoxidáveis proporciona alta durabilidade, mas seu custo muito elevado é limitante e os aditivos inibidores de corrosão e sensores galvânicos emergem como alternativas acessíveis e eficazes, embora exijam monitoramento contínuo para garantir seu desempenho. Conclui-se que a implementação dessas tecnologias pode reduzir impactos ambientais e custos de manutenção, promovendo edificações mais duráveis e sustentáveis, desde que fundamentada em prescrições normativas e pesquisas inovadoras.

Palavras-chave: Corrosão das armaduras. Sustentabilidade. Concreto Armado. Tecnologias de Reparo. Construção Civil.

ABSTRACT

Reinforcement corrosion in reinforced concrete compromises the durability and safety of structures, making it one of the major challenges in civil construction. This study examines the sustainability profile of emerging technologies used in repairing this anomaly, focusing on environmental, social, and economic aspects. The adopted methodology were based on a literature review and a comparative analysis of the main technological innovations aimed at corrosion mitigation, such as self-healing concrete, nanotechnology, stainless steel reinforcements, corrosion-inhibiting additives, and galvanic monitoring sensors. The results indicate that there is no single solution to eliminate corrosion, requiring the selection of the most suitable technology according to the project's context. Self-healing concrete and nanotechnology improve mechanical properties and preventive maintenance strategies; however, they present challenges related to cost and large-scale production. Stainless steel reinforcements offer high durability, but their significantly high cost is a limiting factor. Meanwhile, corrosion-inhibiting additives and galvanic sensors emerge as cost-effective and efficient alternatives, although they require continuous monitoring to ensure performance. It is concluded that the implementation of these technologies can reduce environmental impacts and maintenance costs, fostering more durable and sustainable buildings, provided they are supported by regulatory guidelines and innovative research.

Keywords: Reinforcement Corrosion. Sustainability. Reinforced Concrete. Repair Technologies. Civil Construction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.	5
Figura 2 – Formação de semipilha em meio de concreto armado.	5
Figura 3 – Célula de corrosão no meio concreto armado.	6
Figura 4 – Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto.....	7
Figura 5 - Aparência superficial da corrosão generalizada desencadeada pela carbonatação do concreto (a) e da corrosão puntiforme desencadeada pela ação dos íons cloreto (b).....	7
Figura 6 – Tipos de corrosão.	8
Figura 7 – Representação do avanço do processo de carbonatação.	9
Figura 8 – Influência da concentração de CO ₂ no ambiente no coeficiente de carbonatação. .	10
Figura 9 – Formação do pite de corrosão pela ação dos íons cloreto.	11
Figura 10 – Influência da relação água/cimento na penetração de cloretos no concreto.	12
Figura 11 – Representação esquemática da difusão de CO ₂ nas situações de poros secos (a), poros parcialmente com água (b) e poros saturados (c).	13
Figura 12 - Fases da instalação do processo de corrosão em uma barra de armadura.	14
Figura 13 – Esforços produzidos pelos produtos de corrosão, levando à ruptura do concreto.	15
Figura 14 – Probabilidade de Corrosão em relação ao valor de Resistividade Elétrica do Concreto	17
Figura 15 – Ensaio de potencial de corrosão com eletrodo de CuSO ₄	18
Figura 16 – Critérios de avaliação do potencial de corrosão.....	18
Figura 17 – Exemplo de identificação de falhas de uma estrutura por termografia.....	19
Figura 18 – Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.	20

Figura 19 – Medidas de carbonatação em testemunhos, corpos de prova (a) e estruturas reais <i>in loco</i> (b), com soluções de fenolftaleína.	21
Figura 20 – Autocicatrização de fissuras, comparação entre o Dia 1 e Dia 120.	25
Figura 21 – Análise microscópica de autocicatrização.	25
Figura 22 – Reação pozolânica da sílica coloidal (nano SiO ₂) na pasta de cimento.....	27
Figura 23 – Microestrutura do concreto com sílica coloidal.	28
Figura 24 – Três tipos de quiralidade: (a) zig-zag, (b) armchair e (c) chiral.....	29
Figura 25 – Sensor escada (Anode Ladder).....	37
Figura 26 – Sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode).	37
Figura 27 – Sensor de múltiplos eletrodos (CorroWatch Multisensor).....	38
Figura 28 – Sensor 900 (Concrete Multi-depth Sensor, Model 900).	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.	12
Tabela 2 – Resumo das inovações tecnológicas empregadas para inibição da corrosão de armaduras.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2 CORROSÃO DE ARMADURAS	4
2.1 CONCEITO.....	4
2.2 PRINCIPAIS FATORES CAUSADORES.....	8
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO.....	11
2.4 CONSEQUÊNCIAS	14
2.5 DIAGNÓSTICO	15
3 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E TENDÊNCIAS.....	22
3.1 CONCRETO AUTOCICATRIZANTE	22
3.2 CONCRETO COM NANOTECNOLOGIA	26
3.3 AÇO INOXIDÁVEL.....	30
3.4 ADITIVOS INIBIDORES DE CORROSÃO	31
3.5 SENSORES GALVÂNICOS DE MONITORAMENTO	34
4 PERFIL SUSTENTÁVEL DAS TECNOLOGIAS	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Desde as civilizações antigas, as construções têm desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento da sociedade, proporcionando abrigo, infraestrutura e conectividade. Com o avanço da engenharia, novos materiais e técnicas construtivas foram desenvolvidos para aumentar a resistência mecânica e a durabilidade das edificações (SOUZA & RIPPER, 1998).

Apesar dos avanços tecnológicos, a deterioração estrutural continua sendo um grande desafio, principalmente devido à ação de fatores ambientais, como a corrosão das armaduras. Esse fenômeno ocorre quando agentes agressivos, como dióxido de carbono e cloretos, penetram no concreto e atingem as armaduras de aço, comprometendo sua resistência mecânica e aderência (DOURADO, *et al.*, 2022). Essa manifestação patológica compromete a integridade estrutural, aumentando a necessidade de reparos frequentes e gerando um ciclo contínuo de manutenção que impacta diretamente a economia, a sustentabilidade e a segurança das edificações.

A constante necessidade de reparos em estruturas corroídas causa impactos ambientais, sociais e econômicos consideráveis. Esse processo gera grandes volumes de resíduos da construção civil, além de demandar mais matéria-prima e energia para a extração e execução dos reparos, o que eleva as emissões de CO₂. As manutenções frequentes comprometem a funcionalidade das edificações, gerando riscos à segurança da população e impactando sua qualidade de vida, além de elevar os gastos com a recuperação estrutural, o que aumenta os custos da construção civil.

Diante desse cenário, a busca por soluções inovadoras, como concretos autocicatrizantes, nanotecnologia, aços inoxidáveis e sensores de monitoramento, torna-se essencial para aumentar a durabilidade e sustentabilidade das construções, mitigando os efeitos da corrosão, reduzindo a necessidade de manutenções corretivas e prolongando a vida útil da estrutura.

1.1 JUSTIFICATIVA

A sustentabilidade e a durabilidade estão interligadas na construção civil, uma vez que ambas visam minimizar os impactos ambientais e otimizar o uso dos recursos naturais, assegurando que as estruturas mantenham suas propriedades e funcionalidade ao longo do tempo, sem a necessidade de manutenções ou reconstruções frequentes. No entanto, a deterioração precoce das estruturas tem gerado um impacto negativo nesses aspectos,

comprometendo a sustentabilidade e a eficiência do setor. Diante disso, é fundamental aprimorar os projetos de concreto armado, incorporando inovações tecnológicas que garantam maior durabilidade e vida útil das construções. Essa abordagem contribui para a redução de desperdícios, aumenta a sustentabilidade e previne danos como fissuras, corrosão e expansões, especialmente em ambientes agressivos. Além disso, projetos mais duráveis favorecem uma gestão mais eficiente de custos, recursos humanos e respeito ao meio ambiente, promovendo a economia e prolongando a vida útil das estruturas.

Portanto, a elaboração deste trabalho é fundamental para que as inovações tecnológicas disponíveis no mercado para a mitigação da corrosão de armaduras de concreto armado sejam avaliadas não apenas sob a perspectiva técnica, mas também em relação ao seu perfil sustentável. A disseminação desse conhecimento contribui para que os profissionais estejam cientes das melhores alternativas para solucionar as manifestações patológicas e promover a construção sustentável, além de atuar para o enriquecimento o repositório acadêmico sobre o tema.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa, como objetivo geral, analisar o perfil sustentável das novas tecnologias utilizadas para reparar a corrosão de armadura de estruturas de concreto armado, com base em indicadores ambientais, sociais e econômicos.

Para atingir os propósitos desse trabalho, são destacados os seguintes objetivos secundários:

- Realizar uma revisão bibliográfica da literatura existente sobre a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, abrangendo diagnósticos e inovações tecnológicas para mitigação dessa manifestação patológica, como concretos autocicatrizantes, nanotecnologia, aços inoxidáveis, aditivos inibidores de corrosão e sensores galvânicos de monitoramento;
- Avaliar fatores como eficiência, propriedades mecânicas, químicas e físicas, durabilidade, custos e rendimento das tecnologias abordadas;
- Avaliar o desempenho dessas tecnologias e dos materiais utilizados, considerando os indicadores sustentáveis, abordando os aspectos ambiental, social e econômico;

- Avaliar os principais benefícios e desafios decorrentes das inovações analisadas no âmbito da construção sustentável.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado de acordo com a sequência a seguir:

No primeiro capítulo, intitulado Introdução, são apresentados os objetivos do trabalho, além de sua contextualização e justificativa.

No Capítulo 2 é apresentado o conceito de corrosão de armaduras em concreto armado, onde é feita uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, abordando também sobre as causas, consequências e alguns dos métodos de diagnóstico dessa manifestação patológica.

No Capítulo 3, são apresentadas algumas inovações tecnológicas e tendências existentes no mercado para combater a corrosão das armaduras, como concretos autocicatrizantes, nanotecnologia, aços inoxidáveis, aditivos inibidores de corrosão e sensores galvânicos de monitoramento. Essas inovações estão detalhadas de forma a avaliar suas vantagens e desvantagens sob as perspectivas sustentável, econômica e social. A avaliação e análise acerca do perfil sustentável dessas tecnologias e de seus materiais empregados estão apresentados no Capítulo 4.

As considerações finais em relação ao presente trabalho estão dispostas no Capítulo 5.

2 CORROSÃO DE ARMADURAS

As estruturas de concreto armado, compostas pela combinação de materiais constituintes como areia, brita, cimento, aço e água, são amplamente reconhecidas por sua alta resistência à compressão e à tração, o que possibilita a realização de diversos projetos na engenharia civil. No entanto, essas características podem ser alteradas por diversos fatores, tanto intrínsecos quanto extrínsecos, que podem provocar a degradação do concreto e a corrosão das armaduras, a qual pode comprometer seriamente a vida útil e a estabilidade da estrutura (SOUZA & RIPPER, 1998).

Segundo Meira (2017), essa problemática é observada em todo o Brasil, sendo que, na região Sudeste, cerca de 30% das manifestações patológicas armaduras em estruturas de concreto armado são causadas pela corrosão das armaduras, enquanto no Nordeste esse índice atinge 64%. Esses casos registrados demonstram como essa manifestação patológica tem ocorrido com crescente frequência e volume, gerando um impacto financeiro significativo relacionado ao problema.

2.1 CONCEITO

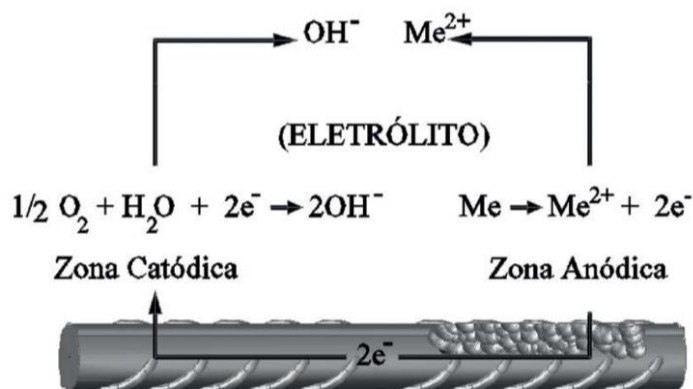
A corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material, que resulta na perda de suas propriedades físicas e químicas, em decorrência da ação de agentes químicos ou eletroquímicos presentes no ambiente (SOUZA & RIPPER, 1998).

O processo de corrosão pode ocorrer de forma química ou eletroquímica, sendo esta última a de maior relevância para a construção civil, visto que afeta as estruturas de concreto armado e pode ocasionar degradações significativas (MEIRA, 2017).

A corrosão eletroquímica é desencadeada pela formação de uma pilha eletroquímica, resultante do contato entre a solução aquosa presente no concreto (eletrólito) e as barras de aço (condutor metálico). Nesse processo, ocorre uma reação de oxidação na zona anódica, onde o ferro metálico se transforma no íon ferro (Fe^{2+}), levando à dissolução do metal. Por sua vez, na zona catódica, ocorre uma reação de redução, que utiliza os eletrólitos gerados para formar o íon hidróxido (OH^-), a partir do oxigênio (O_2) e da água (H_2O). Em razão da diferença de potencial entre o ânodo, de maior eletronegatividade, e o cátodo, os íons Fe^{2+} e OH^- resultam na formação de hidróxido ferroso, de coloração amarelada, depositado no ânodo, enquanto no cátodo forma-se o hidróxido férrico, de coloração avermelhada, constituindo então a ferrugem,

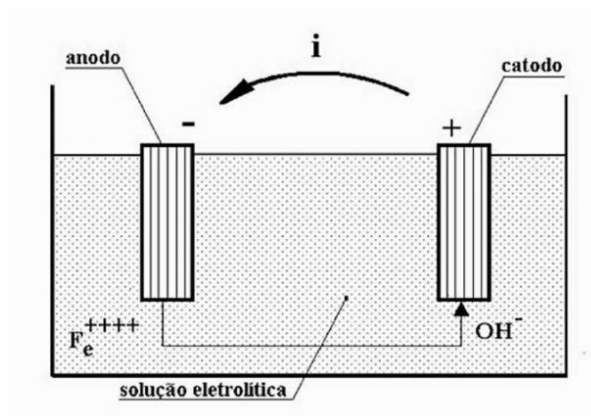
que é a evidência mais visível da corrosão do aço, conforme ilustrado pelas Figuras 1 e 2 (SOUZA & RIPPER, 1998).

Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.



Fonte: FIGUEIREDO & MEIRA, 2013.

Figura 2 – Formação de semipilha em meio de concreto armado.

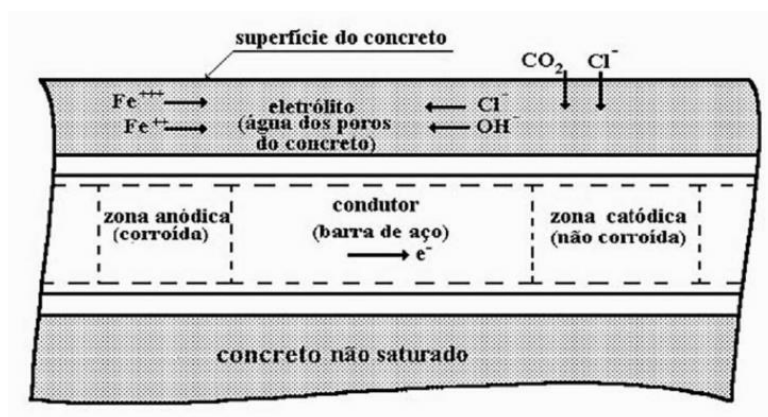


Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

A corrosão ocorre somente na presença de um eletrólito, ou seja, de uma solução aquosa no concreto, como já mencionado anteriormente. Essa é responsável por permitir o fluxo de corrente dos íons, facilitando o processo corrosivo. Assim, em concretos com pouca umidade nos poros, a velocidade da corrosão é reduzida, uma vez que a resistividade do sistema aumenta (MEIRA, 2017). De maneira análoga, o oxigênio é fundamental para que as reações no cátodo ocorram. Portanto, em regiões onde a concentração desse gás é baixa, a velocidade das reações de redução diminui, o que, por conseguinte, reduz a taxa de oxidação do aço (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Mesmo passível de corrosão, o concreto armado oferece uma proteção dupla às armaduras, sendo física e química. A proteção física é garantida pelo cobrimento do concreto, que impede o contato direto do aço com o meio externo. Já a proteção química é garantida por uma película passivadora formada ao redor da superfície do aço (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013). Essa película resulta da alta alcalinidade do concreto, quando seu pH está superior a 9, ocasionada pela reação entre o contato da camada de óxido de ferro superficial das barras, o excesso de água de amassamento, que não é absorvido e preenche os poros do concreto, e os sais minerais presentes no cimento (SOUZA & RIPPER, 1998). Esse processo impede a dissolução do ferro e bloqueia a penetração de umidade, oxigênio e outros agentes agressivos na superfície do aço, como exemplificado na Figura 3 (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013). Dessa forma, a perda de estabilidade da camada passivadora, causada pelo contato com o meio externo e pela subsequente penetração de substâncias agressivas e eletrólise, resulta no início do processo de corrosão das armaduras (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Figura 3 – Célula de corrosão no meio concreto armado.

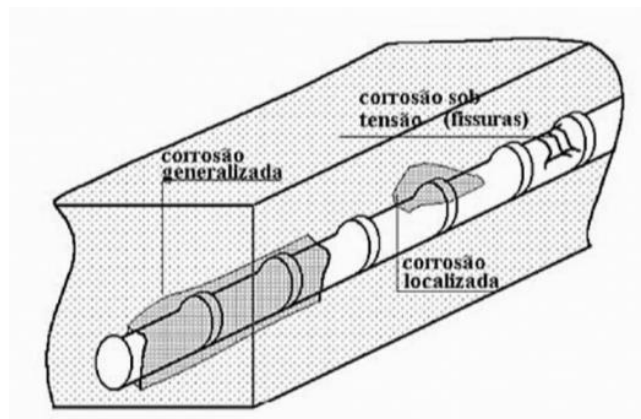


Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

A corrosão pode se manifestar de duas formas: generalizada ou localizada. Quando ocorre de maneira generalizada, a corrosão atinge a superfície do metal de forma parcialmente uniforme, afetando grandes áreas da armadura e causando perda de material de forma regular ou irregular, comprometendo parte da seção do aço (MEIRA, 2017). Esse tipo de corrosão é geralmente causado pela carbonatação, processo em que o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera interage com o concreto, penetrando por meio de seus poros e fissuras, o que leva à desintegração do material (SOUZA & RIPPER, 1998).

Por outro lado, a corrosão localizada ocorre em áreas restritas da superfície, em regiões mais anódicas do que as demais, devido à heterogeneidade do aço ou do eletrólito presente (MEIRA, 2017). Comparada à corrosão generalizada, a corrosão localizada tende a se aprofundar mais rapidamente na barra de aço, uma vez que o processo é mais concentrado, como mostrado pelas Figuras 4 e 5 (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Figura 4 – Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto.



Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

Figura 5 - Aparência superficial da corrosão generalizada desencadeada pela carbonatação do concreto (a) e da corrosão puntiforme desencadeada pela ação dos íons cloreto (b).



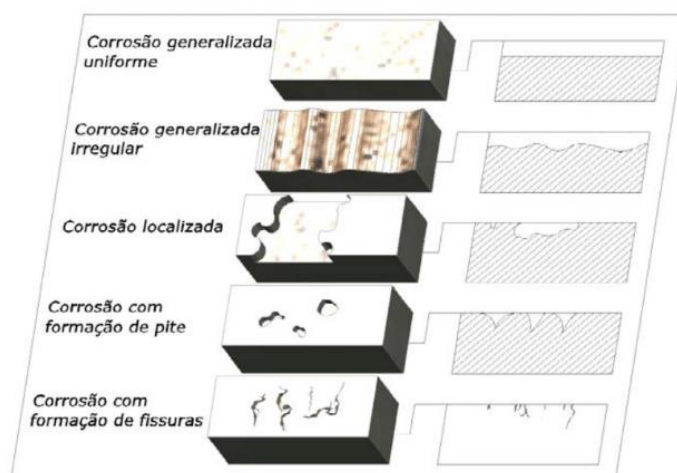
Fonte: MEIRA, 2017.

A partir dos esses dois tipos principais de corrosão, podem surgir outras variações, como a corrosão por pites, que é provocada pela ação de agentes agressivos, como os íons cloreto, que, na presença de umidade e oxigênio, são capazes de romper a camada protetora da armadura

em pontos específicos da superfície, onde há maior atividade eletroquímica do que nas demais áreas (SOUZA & RIPPER, 1998).

Ademais, existe a corrosão com formação de fissuras ou corrosão por tensão fraturante, que ocorre quando as barras de aço estão sujeitas a tensões de tração, como no caso das armaduras protendidas. Em meios agressivos, essas tensões podem resultar na formação de fissuras, comprometendo as propriedades mecânicas das barras e, conseqüentemente, a integridade da estrutura (MEIRA, 2017). Esses tipos de corrosão citados podem ser observados pela Figura 6.

Figura 6 – Tipos de corrosão.



Fonte: MEIRA, 2017.

2.2 PRINCIPAIS FATORES CAUSADORES

A durabilidade do concreto está diretamente relacionada às interações entre o ambiente, a microestrutura e as propriedades dos materiais, as quais se alteram com o tempo e influenciam simultaneamente na degradação dos elementos estruturais, afetando o comportamento tanto do concreto quanto das armaduras (DOURADO, *et al.*, 2022). Essas interações, como a presença de íons cloreto, a carbonatação e a escassez de oxigênio, podem intensificar e acelerar as reações de corrosão das armaduras no concreto armado.

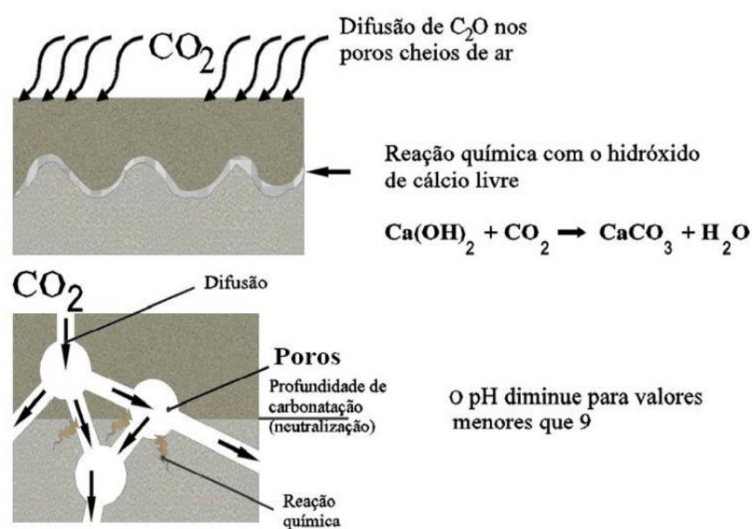
Ademais, é importante ressaltar que, para a formação dos produtos resultantes dos processos de corrosão das armaduras, comumente conhecidos como ferrugem, são necessários alguns fatores específicos, como a presença de um eletrólito, como a água, a existência de uma

diferença de potencial entre os eletrodos e a disponibilidade de oxigênio, os quais são fundamentais para causar as reações que levam à formação da ferrugem nas armaduras do concreto armado (HELENE, 1993).

O concreto armado protege as armaduras em função de sua película de passivação, devido à elevada alcalinidade do ambiente, ou seja, pH alto, e ao adequado potencial eletroquímico da armadura. A corrosão acontece quando há a perda da estabilidade da camada de passivação, o que ocorre em decorrência da penetração de substâncias agressivas, como o dióxido de carbono (CO₂), que provoca a carbonatação do concreto de recobrimento (MEIRA, 2017).

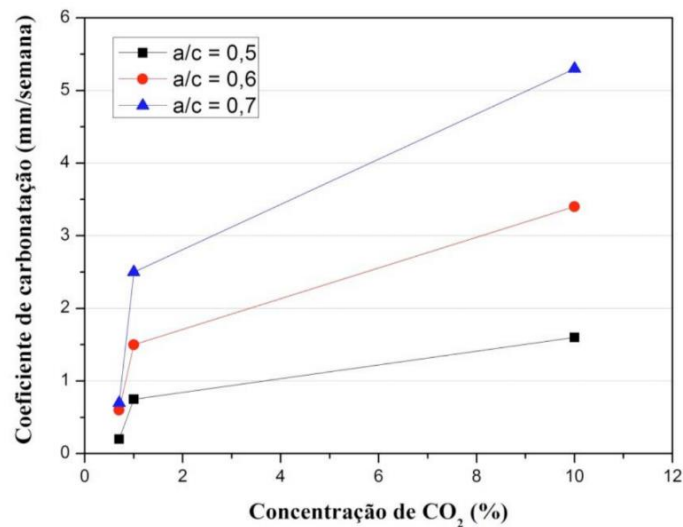
A degradação do concreto por carbonatação ocorre pela penetração do dióxido de carbono, que, ao entrar em contato com os compostos cimentícios, como os hidróxidos de cálcio, sódio e potássio, reage formando carbonatos e H₂O (DOURADO, *et al.*, 2022). Essa reação química reduz a alcalinidade do concreto, de modo que o pH atinja valores próximos a 8, comprometendo a estabilidade da camada de passivação (MEIRA, 2017). Esse processo está ilustrado na Figura 7. A Figura 8 ilustra a influência da concentração de CO₂ no ambiente para diferentes valores da relação água/cimento do concreto, mostrando o aumento da velocidade de carbonatação com a elevação da concentração de CO₂, até atingir a porcentagem natural de concentração de CO₂ no ar de 10%, e com o aumento da relação água/cimento.

Figura 7 – Representação do avanço do processo de carbonatação.



Fonte: MEIRA, 2017.

Figura 8 – Influência da concentração de CO₂ no ambiente no coeficiente de carbonatação.



Fonte: MEIRA, 2017.

Na degradação do concreto devido à falta de oxigênio nos poros, há um aumento na velocidade do processo corrosivo, mas, em contrapartida, não surgem sinais externos de corrosão, o que torna o processo corrosivo ainda mais severo. A ausência de óxidos expansivos provenientes da corrosão ocorre porque, na ausência de oxigênio, a espécie resultante da dissolução do aço na água, os íons Fe²⁺, permanece em solução de forma livre nos poros, sem a formação de óxidos, isso geralmente ocorre quando há imersão em água (DOURADO, *et al.*, 2022).

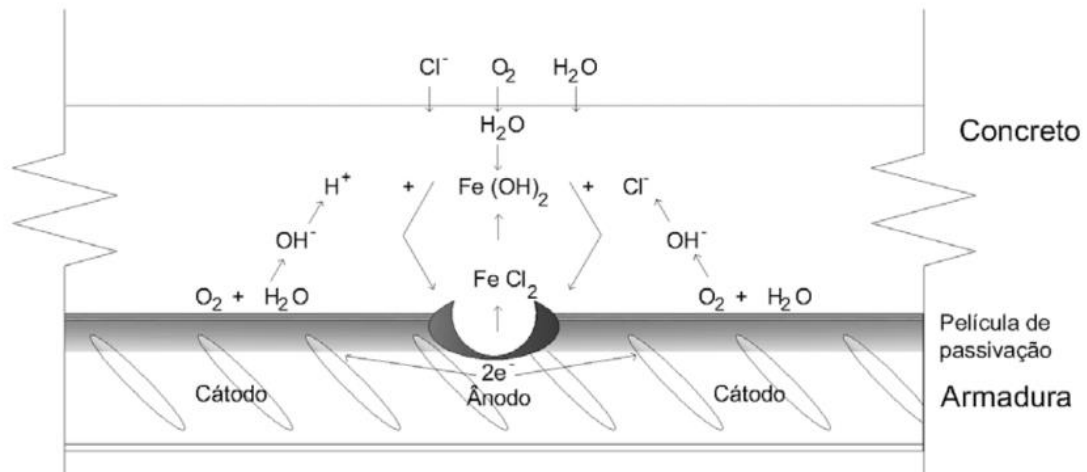
A degradação causada pela ação dos íons cloreto ocorre em conjunto com água e oxigênio, rompendo, de forma pontual, a camada passiva e iniciando o processo de corrosão. Esse efeito pode ocorrer em ciclos de despassivação e repassivação, até que se torne definitivo, ou ainda de forma localizada, gerando corrosão por pites (MEIRA, 2017).

Os cloretos podem estar presentes na mistura de concreto, provenientes da água, de agregados contaminados ou de aditivos à base de cloreto de cálcio. Também podem ser originários do ambiente externo, como águas industriais, águas residuais, ambiente marinho ou dejetos orgânicos, sendo absorvidos devido à porosidade do concreto (MARTINS, 2022).

A Figura 9 ilustra a ação dos íons cloreto na ruptura da capa passiva e no início da corrosão, esses íons reagem com os íons de ferro, formando cloreto de ferro, que perde estabilidade e libera íons cloreto e hidrogênio, reduzindo o pH na zona anódica. Em

contrapartida, a liberação de hidróxidos nas reações catódicas aumenta o pH nas zonas catódicas, dificultando a corrosão futura. Assim, à medida que a corrosão avança, mais íons cloreto penetram no concreto, participando de novas reações (MEIRA, 2017).

Figura 9 – Formação do pite de corrosão pela ação dos íons cloreto.



Fonte: MEIRA, 2017.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO

Além das causas mencionadas para a ocorrência da corrosão, existem fatores adicionais que podem influenciar a corrosão das armaduras, favorecendo o seu desenvolvimento. As armaduras presentes no concreto armado são envolvidas por uma camada de concreto com espessura definida pelo projeto estrutural, o qual proporciona proteção química às armaduras devido ao elevado pH, formando uma camada de passivação (HELENE, 1993). Além dessa proteção química, o cobrimento dificulta a penetração de agentes agressivos e reduz a disponibilidade de água e oxigênio no interior do concreto, elementos essenciais para o processo de corrosão eletroquímica (MARTINS, 2022). O dimensionamento do cobrimento segue as diretrizes da NBR 6118 (ABNT, 2023), que determina a espessura necessária com base na classe de agressividade ambiental, no tipo de estrutura e no tipo de elemento estrutural, conforme apresentado na Tabela 1.

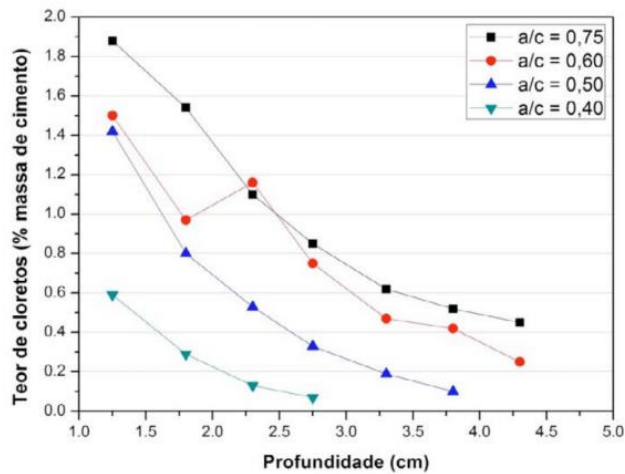
Tabela 1 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10 \text{ mm}$.

Tipo de Estrutura	Componente ou elemento	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

Fonte: Adaptado da NBR 6118:2023 (ABNT, 2023).

Deve-se considerar também a porosidade do concreto que envolve as armaduras, a qual resulta da quantidade, do tamanho e da ligação dos poros no concreto endurecido, facilitando o transporte de agentes agressivos para o interior do material. Como ilustrado na Figura 10, observa-se que a porosidade e a relação água/cimento (a/c) estão correlacionadas, influenciando a velocidade de penetração de agentes agressivos e o processo de carbonatação (MEIRA, 2017). Isso ocorre porque, quanto maior a relação a/c , maior será a porosidade e a permeabilidade do concreto, o que favorece a penetração de cloretos e CO_2 (ANDRADE, 2001).

Figura 10 – Influência da relação água/cimento na penetração de cloretos no concreto.

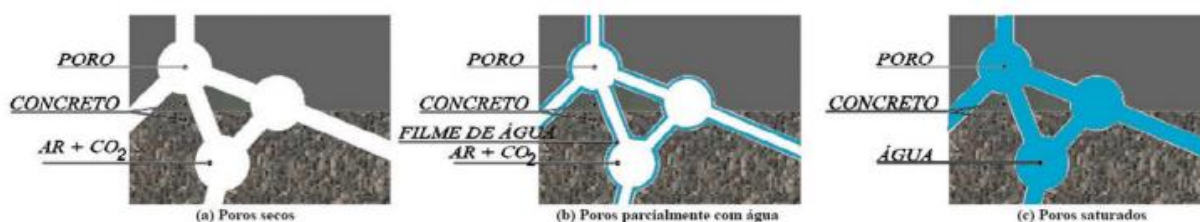


Fonte: MEIRA, 2017.

Adicionalmente, existe uma correlação entre o tempo de cura e a porosidade do concreto, uma vez que, com um tempo de cura reduzido, o grau de hidratação do cimento diminui, aumentando a quantidade de poros e, conseqüentemente, a permeabilidade do concreto (ANDRADE, 2001).

As condições de umidade do ambiente também afetam a corrosão das armaduras, uma vez que influenciam a quantidade de água nos poros do concreto, impactando tanto o transporte de agentes agressivos quanto as reações químicas relacionadas. Para que a carbonatação do concreto avance, é necessária a presença simultânea de água e a possibilidade de difusão de CO_2 . Assim, se os poros estiverem secos devido à baixa umidade relativa, o CO_2 pode penetrar nos poros, mas a reação de carbonatação não ocorre devido à falta de água. Da mesma forma, se os poros estiverem saturados, a carbonatação também não ocorre, pois a difusão do CO_2 na água é mais lenta do que no ar, conforme ilustrado na Figura 11 (ANDRADE, 2001).

Figura 11 – Representação esquemática da difusão de CO_2 nas situações de poros secos (a), poros parcialmente com água (b) e poros saturados (c).



Fonte: MEIRA, 2017.

A umidade relativa em que há o avanço da carbonatação está entre 50% e 80%. Em umidades abaixo de 50%, há restrição da carbonatação pela falta de água nos poros do concreto, enquanto acima de 80%, as reações são limitadas devido à escassez de CO_2 , causada pela saturação dos poros, fazendo com que a carbonatação ocorra mais lentamente e prolongando o início da corrosão nas duas situações (MEIRA, 2017).

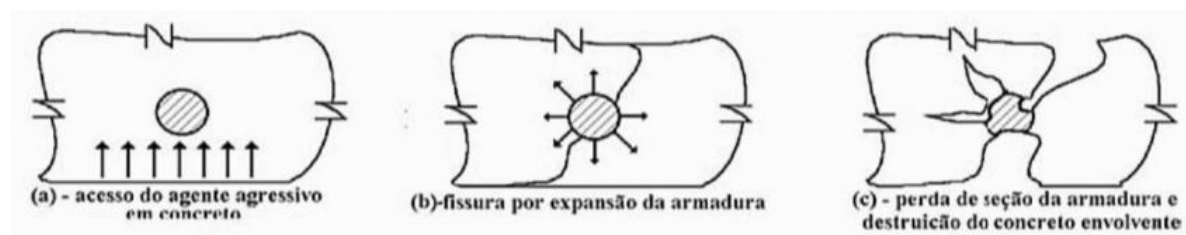
Ademais, o ambiente em que a estrutura está inserida influencia as condições de contato com o agente agressivo. As estruturas imersas no mar têm contato mais intenso com os íons cloreto, enquanto as localizadas em zonas de atmosfera marinha apresentam uma interação progressiva, dependendo da concentração de névoa salina e de fatores como vento, rugosidade e distância do mar. Isso resulta em um acúmulo mais lento de cloretos nas estruturas em

atmosfera marinha, prolongando o período de iniciação da corrosão em comparação com as estruturas submersas (MEIRA, 2017).

2.4 CONSEQUÊNCIAS

De forma resumida, a corrosão das armaduras no concreto armado ocorre pela penetração de agentes agressivos, que se propagam por meio da difusão, absorção ou permeabilidade. Esses agentes provocam a fissuração do concreto armado, em razão das forças de expansão geradas pelos produtos da corrosão, o que resulta no desprendimento do concreto, intensificando a corrosão e comprometendo de maneira significativa a seção da armadura, conforme apresentado na Figura 12 (HELENE, 1993). Sendo assim, observa-se que a capacidade resistente da armadura é diminuída pela redução da área da seção transversal do aço, devido ao dano causado pela ação dos agentes corrosivos, o que pode ocasionar a ruptura de determinadas seções da barra (BARRETTO & PARENTE, 2018).

Figura 12 - Fases da instalação do processo de corrosão em uma barra de armadura.



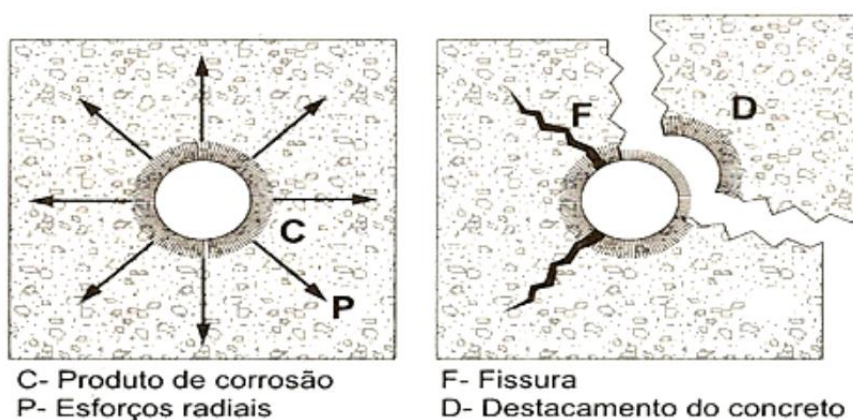
Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

Ademais, outra consequência da corrosão nas armaduras do concreto é a perda da aderência entre o aço e o concreto, resultante da concentração de produtos de corrosão ao longo do comprimento da armadura (BARRETTO & PARENTE, 2018). Tal perda de aderência provoca uma alteração no comportamento da peça estrutural em relação às solicitações a que está sujeita, o que, por conseguinte, compromete o desempenho estrutural de toda a estrutura (SOUZA & RIPPER, 1998).

Simultaneamente, ocorre a desagregação da camada de concreto que envolve a armadura, resultado da oxidação do ferro, uma vez que o óxido de ferro hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) exerce uma pressão de, em média, 15 MPa sobre o concreto, o que leva à sua fratura (SOUZA & RIPPER, 1998).

Como os produtos resultantes da corrosão ocupam um volume de 3 a 10 vezes maior que o do aço original, isso provoca o aumento das tensões internas no concreto, gerando fissuras que, por sua vez, podem levar ao deslocamento do concreto em torno da armadura corroída (BARRETTO & PARENTE, 2018). A ocorrência de fissuração ou deslocamento facilita a entrada de agentes corrosivos, o que acelera o processo de corrosão devido à interação entre o ataque localizado e o ataque generalizado (SOUZA & RIPPER, 1998). Esse processo é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Esforços produzidos pelos produtos de corrosão, levando à ruptura do concreto.



Fonte: BARRETTO & PARENTE, 2018.

Assim, a estrutura que apresenta corrosão nas armaduras tem seu desempenho comprometido, o que reduz sua vida útil e durabilidade, uma vez que diversas propriedades estruturais podem ser afetadas simultaneamente, acelerando o processo de degradação (BARRETTO & PARENTE, 2018).

2.5 DIAGNÓSTICO

O diagnóstico consiste em identificar e descrever de forma detalhada o que causou o problema patológico, explicando o mecanismo, as origens e as razões que levaram ao aparecimento do problema. Esse processo é realizado com base na observação de uma ou mais manifestações patológicas em uma estrutura específica, ou a partir de inspeções realizadas durante um processo regular de manutenção e monitoramento da estrutura, que visam verificar seu estado e prevenir possíveis falhas (HELENE, 1993).

Assim, é essencial realizar uma vistoria detalhada e bem planejada para avaliar as condições reais da estrutura, identificando as anomalias presentes, suas causas, as medidas

necessárias e os métodos que serão utilizados para a recuperação ou o reforço. O processo de inspeção de estruturas convencionais segue uma metodologia em três etapas principais: coleta de dados, análise e diagnóstico (SOUZA & RIPPER, 1998).

A etapa de levantamento dos dados no diagnóstico de estruturas envolve a análise do ambiente e da agressividade externa, a realização de inspeções visuais, medições de deformações e a avaliação de danos, com o objetivo de identificar sintomas patológicos e falhas no projeto ou na execução. Além disso, são realizados ensaios para obter informações precisas sobre a integridade da estrutura. A análise dos dados visa entender o comportamento da edificação e a origem dos sintomas patológicos, sendo realizada de forma detalhada para evitar que problemas graves sejam mascarados. Por fim, o diagnóstico, realizado após essas etapas, pode exigir a coleta de novos dados ou a definição de soluções específicas, como reforços ou até a demolição, sempre avaliando o custo-benefício de cada alternativa (SOUZA & RIPPER, 1998; HELENE, 1993).

Para que o processo de diagnóstico ocorra de forma assertiva, é fundamental realizar avaliações detalhadas da estrutura, por meio de ensaios que analisam as condições das estruturas de concreto e detectam problemas que possam comprometer sua integridade. Com foco na identificação da corrosão das armaduras, a seguir serão apresentados alguns dos principais ensaios utilizados para detectar essa corrosão em estruturas de concreto armado.

A resistividade elétrica é uma propriedade que descreve a capacidade de um material de resistir à passagem de corrente elétrica quando é submetido a uma diferença de potencial (voltagem). Em outras palavras, ela indica o grau de resistência à corrente elétrica no material, sendo a relação entre a tensão aplicada e a corrente medida (CARVALHO, 2023; SILVA, et. al, 2022). Essa propriedade depende da estrutura e composição do concreto, incluindo fatores como o tamanho e a quantidade de poros, a concentração de água livre e as características ambientais de exposição. A resistividade elétrica está relacionada ao processo de corrosão das armaduras no concreto, podendo indicar a umidade interna, a presença de íons cloreto e a taxa de corrosão das armaduras (COSTA, *et al.*, 2017).

A resistividade elétrica do concreto é medida por um ensaio não destrutivo, que pode ser realizado tanto em laboratório quanto *in loco*, podendo ser utilizada a técnica dos quatro eletrodos, com o método de Wenner, que determina a resistividade elétrica superficial do concreto (COSTA, et. al, 2017). Esse ensaio consiste no posicionamento de quatro eletrodos

em contato com o concreto, formando um campo elétrico, onde dois eletrodos externos emitem corrente elétrica de um para o outro, enquanto os outros dois eletrodos internos captam a diferença de potencial gerada. Assim, a resistividade é determinada pela leitura da corrente elétrica resultante dessa diferença de potencial (COSTA, *et al.*, 2017; SILVA, *et al.*, 2022).

Esse ensaio permite correlacionar a probabilidade de corrosão da estrutura com a resistividade elétrica obtida. De acordo com a Figura 14 abaixo, observa-se que, quanto maior a resistividade elétrica, menor o risco de corrosão da estrutura de concreto armado. Por outro lado, altas taxas de corrosão, causadas pelo aumento do teor de cloretos no concreto, reduzem significativamente a resistividade elétrica (COSTA, *et al.*, 2017; SILVA, *et al.*, 2022). Além disso, a resistividade tende a diminuir com o aumento da umidade, já que a maior penetração de água no concreto eleva o grau de umidade, o que facilita o fluxo de corrente elétrica e, conseqüentemente, reduz a resistividade (COSTA, *et al.*, 2017; CARVALHO, 2023).

Figura 14 – Probabilidade de Corrosão em relação ao valor de Resistividade Elétrica do Concreto

RESISTIVIDADE ELÉTRICA	
Resistividade do concreto ($\Omega.m$)	Probabilidade de Corrosão
Maior que 200	Desprezível
Entre 100 e 200	Baixa
Entre 50 a 100	Alta
Menor que 50	Muito Alta

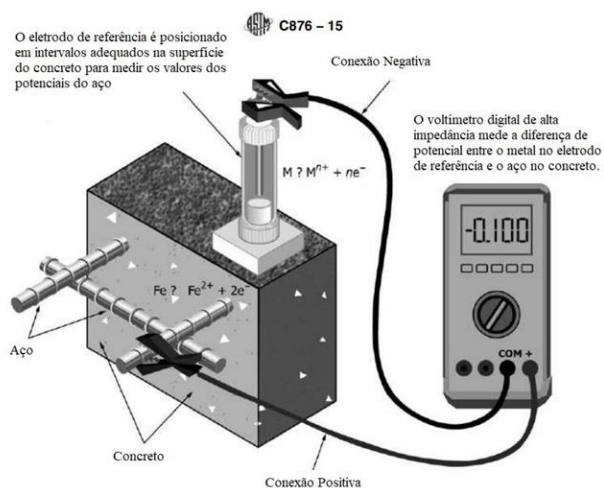
Fonte: CARVALHO, 2023.

Esse método se destaca por permitir o estudo da durabilidade das estruturas de concreto, estabelecendo a relação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão, diretamente no local, sem a necessidade de extração de testemunhos e com baixo custo. Dessa forma, possibilita uma avaliação eficiente e economicamente viável do estado de corrosão em estruturas de concreto armado (SILVA, *et al.*, 2022).

O potencial de corrosão, também chamado de potencial de eletrodo ou eletroquímico, é uma técnica não destrutiva usada para avaliar a probabilidade de corrosão nas barras de aço do concreto armado. Esse método mede o potencial de corrosão das barras de aço em relação a um eletrodo de referência, geralmente composto por cobre/sulfato de cobre, que entra em contato com a superfície do concreto. O objetivo é verificar se a armadura está ou não passando por um processo de corrosão. A técnica é padronizada pela norma internacional ASTM C 876 e pode ser realizada, de forma simplificada, com um voltímetro de alta impedância, o qual é conectado

ao aço (terminal positivo) para medir a diferença de potencial, enquanto o eletrodo de cobre-sulfato de cobre (conexão negativa) é imerso em uma solução de CuSO_4 e posicionado próximo à armadura a ser analisada (CARVALHO, 2023; DOURADO, *et al.*, 2022; SILVA, *et al.*, 2022). Esse procedimento é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Ensaio de potencial de corrosão com eletrodo de CuSO_4 .



Fonte: CARVALHO, 2023.

Assim, para verificar a corrosão na armadura em um elemento estrutural, mede-se a corrente elétrica e, com base nos resultados, avalia-se o potencial de corrosão presente no ambiente (SILVA, *et al.*, 2022). O valor obtido para o potencial de eletrodo (mV) pode ser analisado e interpretado conforme a Figura 16 a seguir, que apresenta os valores de referência para avaliar a probabilidade de corrosão, com base no potencial medido (DOURADO, *et al.*, 2022; CARVALHO, 2023).

Figura 16 – Critérios de avaliação do potencial de corrosão.

Potencial de Eletrodo (mV)	Probabilidade de Corrosão
$E > -200$	< 5%
$-200 > E > -350$	Incerta (50%)
$-350 > E$	> 95%

Fonte: DOURADO, *et al.*, 2022.

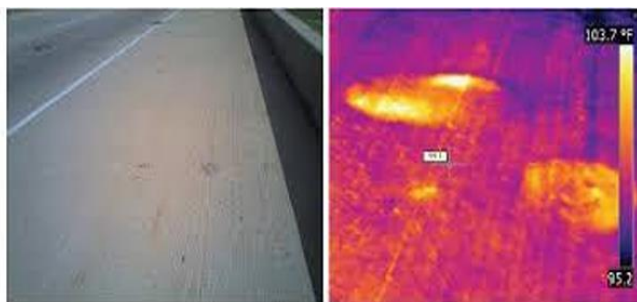
Embora seja uma metodologia de fácil aplicação e baixo custo, a técnica pode apresentar limitações devido à influência de fatores como o teor de umidade do concreto, o nível de

oxigênio próximo à interface, a presença de microfissuras ou correntes parasitas, além da presença de cloretos, carbonatação, espessura do revestimento e qualidade do concreto, (DOURADO, *et al.*, 2022; CARDOSO, SILVA & PIRES, 2022). Além disso, a técnica utilizada para medir a diferença de potencial oferece apenas dados qualitativos sobre o estado da armadura analisada (CARVALHO, 2023).

A termografia é uma técnica de diagnóstico que, de forma não destrutiva e não invasiva, permite a criação de imagens térmicas a partir da emissividade dos materiais. Isso significa que ela detecta a radiação infravermelha emitida de maneira natural pelos corpos, sendo sua intensidade diretamente proporcional à temperatura desses materiais (OLIVEIRA, *et al.*, 2020; DANTAS NETO, *et al.*, 2020).

A partir dessa técnica, são geradas imagens do local, chamadas de termogramas, nos quais a câmera capta a temperatura superficial e a converte em uma imagem. Para que essa análise seja possível, é necessário que exista um diferencial térmico entre o meio e o corpo (CARDOSO, SILVA & PIRES, 2022). Normalmente, utilizam-se câmeras termográficas que apresentam paletas de cores, nas quais branco, vermelho e amarelo indicam níveis mais elevados de energia, enquanto violeta, azul e preto representam os níveis mais baixos (DANTAS NETO, *et al.*, 2020), como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Exemplo de identificação de falhas de uma estrutura por termografia.



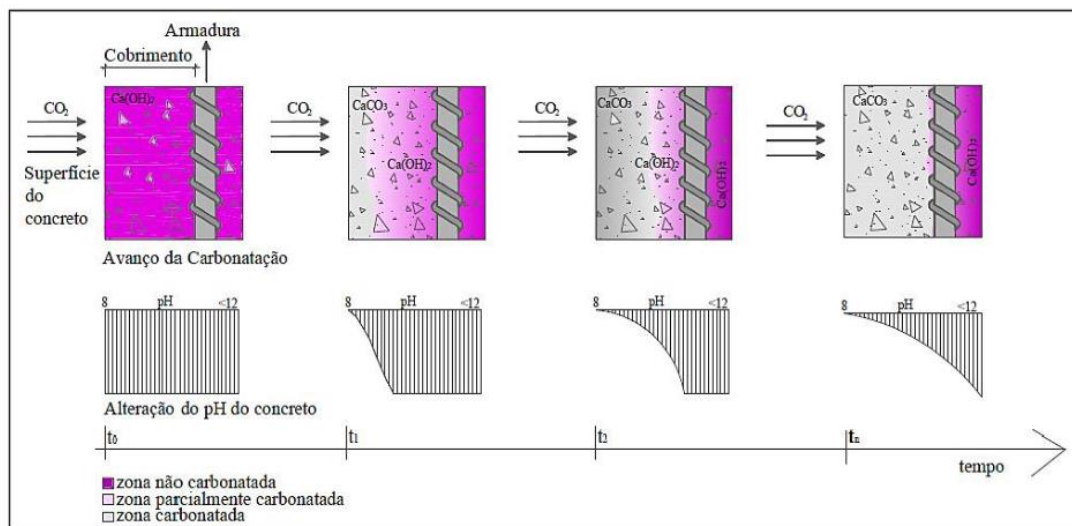
Fonte: CARDOSO, SILVA & PIRES, 2022.

Essa técnica permite mapear áreas danificadas, identificando e localizando a origem de manifestações patológicas visíveis. Além disso, ela pode ser utilizada para detectar anomalias ainda não visíveis a olho nu, mesmo em estágios iniciais, como trincas em vigas subterrâneas, corrosão em concreto armado e umidade no revestimento cerâmico de fachadas, entre outras (OLIVEIRA, *et al.*, 2020; DANTAS NETO, *et al.*, 2020).

A termografia se destaca principalmente por possibilitar análises precisas não destrutivas, sem a necessidade de contato físico com o local analisado, o que garante que a estabilidade da estrutura não seja comprometida durante o processo (DANTAS NETO, *et al.*, 2020; OLIVEIRA, *et al.*, 2020). Embora fatores como as propriedades do material, as condições ambientais e o posicionamento da câmera possam influenciar os resultados, recomenda-se realizar a captura de imagens durante a noite ou em dias nublados para minimizar essas interferências e reduzir a perda de calor por convecção (DANTAS NETO, *et al.*, 2020).

A carbonatação é um processo que afeta a estrutura do concreto, diminuindo seu pH e reduzindo a proteção passiva das armaduras, o que aumenta o risco de corrosão e reduz a durabilidade da construção (CARDOSO, SILVA & PIRES, 2022). Esse fenômeno ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no concreto, formando carbonato de cálcio (CaCO_3). À medida que a carbonatação avança, o concreto passa a ter uma camada superficial com pH mais baixo, enquanto o interior ainda mantém um pH mais alto (CARVALHO, 2023; MEIRA, 2017), como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.



Fonte: DOURADO, *et al.*, 2022.

Para medir a profundidade de carbonatação em concreto armado, o método mais comum é o uso da fenolftaleína em concreto endurecido. Esse processo consiste na medição do CO_2 presente nas amostras e na avaliação do pH com uma solução específica (CARVALHO, 2023). O ensaio é semi-destrutivo, pois exige a retirada de amostras de concreto ou a realização de um

furo ou abertura na estrutura, sendo importante que a amostra tenha uma profundidade maior que o recobrimento das armaduras, sendo preferível que seja obtida por meio de quebra do concreto (DOURADO, *et al.*, 2022).

Para realizar o ensaio, é utilizada uma solução de fenolftaleína a 1% em álcool etílico, que é incolor no início. Quando aplicada na superfície de concreto recém-fraturada, a solução muda de cor conforme o pH: ela fica roxo-púrpura se o pH for superior a 9,5, varia de rosa a roxo-púrpura para pH entre 8 e 9,5, e permanece incolor se o pH for inferior a 8 (MEIRA, 2017). Isso permite identificar as áreas onde a carbonatação ocorreu, com as regiões não carbonatadas apresentando a cor rosada e as carbonatadas permanecendo sem cor, indicando a profundidade da carbonatação na estrutura (CARVALHO, 2023). A Figura 19 apresenta exemplos de aplicação desse método com soluções de fenolftaleína.

Figura 19 – Medidas de carbonatação em testemunhos, corpos de prova (a) e estruturas reais *in loco* (b), com soluções de fenolftaleína.



Fonte: Adaptado de MEIRA (2017).

O principal objetivo desse teste é verificar se a carbonatação alcançou a armadura, o que indicaria o início da corrosão das armaduras. Também é possível analisar a velocidade de avanço da carbonatação, desde que haja informações sobre a idade da estrutura (MEIRA, 2017).

3 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E TENDÊNCIAS

A corrosão das armaduras de concreto armado é um dos principais fatores que comprometem a durabilidade e segurança das estruturas, resultando na degradação do concreto e no risco de falhas estruturais graves. Contudo, profissionais de projeto e execução brasileiros enfrentam dificuldades em adotar medidas de proteção contra essa corrosão, pois, além de as manifestações patológicas não se apresentarem em curto prazo, não existem normas específicas que orientem as técnicas e materiais de reparo, nem estudos que comprovem a eficácia desses métodos (ARARUNA, 2023). O estudo sobre a corrosão deve englobar tanto as estratégias de prevenção quanto os métodos de detecção do problema, além de buscar soluções corretivas, como reparos e reforços, essenciais para restaurar as estruturas danificadas e evitar o colapso, garantindo a segurança das edificações e das pessoas. Neste capítulo, serão abordadas cinco inovações tecnológicas e tendências utilizadas para aumentar a vida útil das estruturas, reduzindo a corrosão das armaduras no concreto armado.

3.1 CONCRETO AUTOCICATRIZANTE

O concreto autocicatrizante consiste em uma estrutura inteligente, capaz de reparar suas próprias fissuras, restaurando suas propriedades superficiais iniciais e preservando sua proteção contra danos, como a corrosão das armaduras, contribuindo assim para o aumento da durabilidade da estrutura (MENDEZ, *et al.*, 2020).

A autocicatrização do concreto é um fenômeno amplamente pesquisado, pois o concreto apresenta propriedades autocicatrizantes, resultantes da hidratação dos minerais de clínquer e da carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Dessa forma, fissuras podem se regenerar com o tempo, embora essa capacidade de autocicatrização seja limitada a espessuras pequenas, variando de 0,1 mm a 0,2 mm, quando há presença de água (LIMA, 2021).

As tipologias de autocicatrização são divididas em autógena e autônoma. A autocicatrização autógena é um processo natural que ocorre pelo fechamento de fissuras devido aos próprios materiais presentes no concreto (cimento e adições pozolânicas). Esse processo é influenciado por dois fatores presentes no concreto: a hidratação contínua das partículas de cimento não hidratadas e a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), resultante da presença de dióxido de carbono (TAKAGI, *et al.*, 2018; LIMA, 2021; MENDEZ, *et al.*, 2020).

A autocicatrização autógena de fissuras no concreto ocorre por meio da formação de cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Durante a hidratação do cimento, alguns grãos de cimento, como a alita e a belita, não reagem completamente com a água, deixando partículas não hidratadas, que ficam envoltas por materiais como C-S-H e portlandita. Quando o concreto sofre fissuração, essas partículas não hidratadas são expostas e começam a reagir com a água, gerando uma nova hidratação e a formação de cristais adicionais de C-S-H, provocando uma expansão volumétrica que preenche as microfissuras, que restaura a integridade do concreto de forma natural (TAKAGI, *et al.*, 2018).

A autocicatrização autônoma, por sua vez, envolve o selamento de fissuras e a restauração das propriedades mecânicas e de permeabilidade do concreto, não apenas devido aos materiais que o compõem, mas também por meio de adições feitas na fase inicial da mistura. Essas adições podem incluir cimento de escória de alto-forno, sílica ativa, soluções químicas e biológicas, materiais com memória de forma, polímeros superabsorventes e aditivos cristalizantes (TAKAGI, *et al.*, 2018; LIMA, 2021; MENDEZ, *et al.*, 2020). Esses componentes atuam de forma ativa no processo de recuperação do concreto, permitindo que ele se repare e mantenha suas propriedades mesmo após sofrer fissuras.

Para que a autocicatrização autônoma ocorra de maneira eficaz, é necessário que o agente cicatrizante tenha uma viscosidade adequada para permitir que ele se desloque até a fissura e atue eficazmente no processo de cicatrização. Se a viscosidade for muito alta, o agente não conseguirá fluir até a fissura, dificultando o processo de autocicatrização. Por outro lado, se for muito baixa, o agente pode ser absorvido pela matriz do concreto antes de atingir a fissura, comprometendo sua ação de reparo (SCHIMIDT, *et al.*, 2022).

Os concretos autocicatrizantes podem ser produzidos através da adição de aditivos químicos combinados com alto teor de finos, como adições minerais, fillers, ou até mesmo pela substituição de cimentos puros por cimentos compostos. Há uma crescente busca por produtos comerciais que atendam a essa finalidade, o que facilita a aplicação prática do concreto autocicatrizante na construção de estruturas (MENDEZ, *et al.*, 2020).

Há uma vasta quantidade de artigos de pesquisa sobre a autocicatrização do concreto, explorando diversas abordagens, como o uso de reforço com fibras, bactérias produtoras de minerais, polímeros superabsorventes, agentes cicatrizantes encapsulados e a adição de aditivos cristalinos, como o PRAH 46 (TAKAGI, *et al.*, 2018).

Os aditivos impermeabilizantes por cristalização integral, ou aditivos cristalinos, são aditivos solúveis que aprimoram várias propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, especialmente devido à sua capacidade autocicatrizante. Essa característica ajuda a reduzir os custos com reparos e manutenção de estruturas, além de proporcionar maior durabilidade ao concreto (LIMA, 2021). De acordo com pesquisadores da técnica, a capacidade de autocicatrização não é limitada pela extensão das fissuras, mas sim pela sua abertura, que não pode ultrapassar 8 mm para que o processo de regeneração seja eficaz (MENDEZ, *et al.*, 2020).

O uso de aditivos cristalinos no concreto visa aumentar a durabilidade das estruturas, ao reduzir a passagem de água e de agentes potencialmente prejudiciais pelas fissuras do material. Isso ocorre quando o concreto, feito com cimento Portland, é misturado com areia de sílica fina tratada e compostos químicos ativos e, ao entrar em contato com a umidade do ambiente e com o hidróxido de cálcio presente no concreto, formam-se produtos cristalinos insolúveis nas fissuras, preenchendo poros e rachaduras. Esse processo aumenta a durabilidade do concreto, especialmente em ambientes com alta agressividade, onde as condições de exposição são severas (LIMA, 2021; SCHIMIDT, *et al.*, 2022).

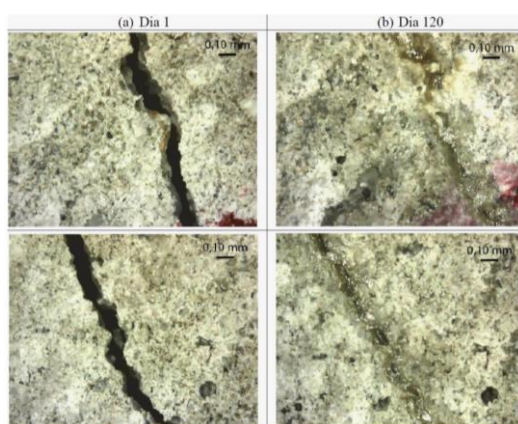
Os aditivos cristalizantes são produtos de fácil acesso e aplicação no mercado, com uma implementação simples em diversas misturas, como cimentos, areias e superplastificantes. Existem diferentes tipos de aditivos e combinações, que variam conforme os materiais utilizados. No entanto, quando comparados aos métodos convencionais, esses aditivos tendem a apresentar um custo mais elevado, porém podem oferecer uma vantagem econômica a longo prazo, uma vez que contribuem para a redução dos custos de manutenção das estruturas, devido à sua capacidade de aumentar a durabilidade do concreto (LIMA, 2021; MENDEZ, *et al.*, 2020).

Diversos fatores podem influenciar a capacidade de cicatrização do concreto, como a composição dos materiais, a relação água/cimento, as quantidades de agregados, o grau de dano à estrutura, a idade em que a primeira fissura ocorre, as condições de umidade relativa, o período e tipo de cura, além das propriedades e quantidades dos aditivos aplicados (MENDEZ, *et al.*, 2020). Além disso, é essencial considerar as condições ambientais em que ocorrerá o processo, já que a água é crucial para a autocura. A formação de C-S-H, que se deposita nas fissuras, depende da água para transportar o hidróxido de cálcio, facilitando o depósito de carbonato de

cálcio nas fissuras, assim, conclui-se que a autocicatrização não depende apenas do tempo, mas também das condições ambientais para ser eficaz (LIMA, 2021).

Na Figura 20, pode-se observar a evolução da autocicatrização com aditivos cristalizantes ao longo de um período de 120 dias. No local das fissuras, é possível visualizar a formação de uma "pasta cristalina" que trata e preenche as degradações presentes no concreto, demonstrando a eficácia do processo de cicatrização proporcionado pelos aditivos (LIMA, 2021).

Figura 20 – Autocicatrização de fissuras, comparação entre o Dia 1 e Dia 120.



Fonte: LIMA, 2021.

Na Figura 21, observa-se o desempenho da autocicatrização em amostras com adição de perlita. É possível verificar que houve um selamento completo das fissuras em maiores extensões, além da autocicatrização que ocorreu nos poros internos e externos da amostra. Esse processo demonstra um grande potencial para aumentar a durabilidade do concreto e recuperar suas propriedades mecânicas ao longo de sua vida útil, evidenciando os benefícios da utilização da perlita na melhoria das características do material (MENDEZ, *et al.*, 2020).

Figura 21 – Análise microscópica de autocicatrização.



Fonte: MENDEZ *et al.*, 2020.

Segundo Schimidt, et al. (2022), amostras de concreto com aditivo cristalizante mostraram que a incorporação do aditivo não afeta negativamente a resistência à compressão, mantendo-a consistente para diferentes idades e relações água/cimento. No caso de amostras fissuradas, o concreto com aditivo apresentou um potencial de corrosão médio e menor eletronegatividade em comparação com amostras sem adição. A adição do aditivo não só melhorou o desempenho do concreto, mas também reduziu a permeabilidade dos corpos de prova, contribuindo para uma melhor proteção das armaduras contra a corrosão (SCHIMIDT, *et al.*, 2022).

A autocicatrização do concreto pode gerar economia tanto em custos diretos, relacionados à manutenção e reparo da estrutura, quanto em custos indiretos, já que essas estruturas não precisam ficar fora de operação durante o processo de reparo. Além disso, os materiais autocicatrizantes são especialmente úteis em locais de difícil acesso para manutenção, como em instalações de resíduos nucleares, tomadas d'água de barragens e lajes de subpressão, proporcionando uma solução mais prática e eficiente para essas situações (MENDEZ, *et al.*, 2020).

3.2 CONCRETO COM NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia, que se dedica à manipulação da matéria em nível atômico e molecular, tem sido empregada na engenharia por meio de nanomateriais, com o objetivo de criar novos materiais e melhorar as propriedades dos materiais existentes. No entanto, embora promissora, sua aplicação ainda apresenta incertezas quanto à influência no desempenho de matrizes cimentícias e à sua real eficácia (PINTO, 2022; SOARES, *et al.*, 2023).

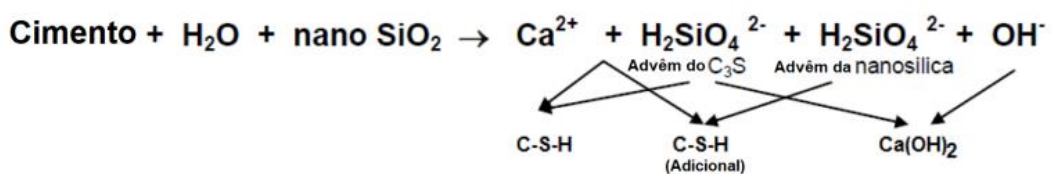
A adição de nanomateriais, como nanotubos de carbono (NTC) e nanosílica, permite a manipulação das interações químicas na matriz cimentícia, resultando na redução da porosidade, o que contribui para a prevenção de microfissuras. Isso diminui a permeabilidade do material e aumenta sua capacidade de suportar tensões, tornando-o mais resistente e menos suscetível ao aparecimento de fissuras e à corrosão. Além disso, a incorporação de nanomateriais nas pastas cimentícias melhora a resistência à tração das matrizes cimentícias, reduzindo os riscos de surgimento de fissuras que podem comprometer a integridade estrutural da peça (SOARES, *et al.*, 2023).

O uso de nanomateriais na matriz cimentícia resulta em alterações significativas nas propriedades do concreto, sendo que, em geral, observam-se o aumento do Módulo de Elasticidade, devido à redução dos vazios e poros, e o incremento da Resistência à Tração por Flexão. No entanto, quando o teor de nanomaterial é elevado, pode-se observar uma diminuição na Resistência à Compressão (SOARES, *et al.*, 2023). Assim, a quantidade de nanomaterial adicionada ao concreto influencia diretamente as propriedades do material, sendo essencial a realização de estudos aprofundados para determinar o teor ótimo de cada nanomaterial, a fim de atender às necessidades específicas de melhoria do concreto em diferentes contextos.

A nanosílica, ou sílica coloidal, é composta por nanopartículas de dióxido de silício amorfo (nano SiO₂) com dimensões variando de 2 a 20 nm e uma área superficial específica que vai de 300 a 900 m²/g, sendo estabilizadas em suspensão aquosa (BERNARDO, 2024). Sua incorporação em argamassas e concretos resulta em melhorias na eficiência das estruturas, devido à sua capacidade aglomerante, que contribui para a redução do volume de vazios e, conseqüentemente, da porosidade nas matrizes (SOARES, *et al.*, 2023).

A sílica coloidal possui uma atividade pozolânica na matriz do concreto, o que resulta em uma reação que favorece a formação adicional de C-S-H, acelerando a hidratação do cimento (Figura 22). Além de reagir rapidamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) liberado durante a hidratação do cimento, gerando compostos sólidos de silicato de cálcio hidratado, que preenchem os espaços capilares, aumentando a resistência à compressão do concreto (SOARES, *et al.*, 2023). Além disso, a nanosílica atua como um "filler", densificando a microestrutura do concreto e aumentando a viscosidade e a consistência da mistura. Isso mantém as partículas finas unidas à sua estrutura, distribuindo de forma uniforme os produtos da hidratação e resultando em uma estrutura com menor porosidade, permeabilidade e maior resistência (SOARES, *et al.*, 2023; BERNARDO, 2024). Outro efeito positivo é a capilaridade gerada pela nano porosidade do gel formado na reação, que retém a água no sistema e previne a exsudação, contribuindo ainda mais para a durabilidade do material (BERNARDO, 2024).

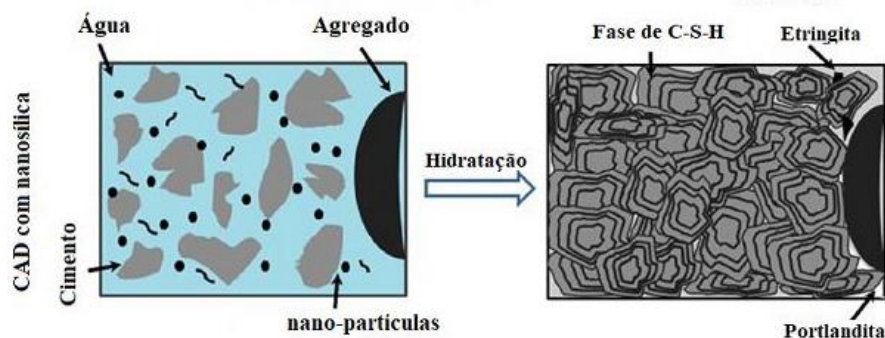
Figura 22 – Reação pozolânica da sílica coloidal (nano SiO₂) na pasta de cimento



Fonte: BERNARDO, 2024.

A Figura 23 ilustra a microestrutura do concreto de alto desempenho (CAD) com sílica coloidal, destacando a alta densidade do C-S-H após a hidratação. Nesse contexto, observa-se que a zona de transição entre a pasta e o agregado é praticamente não existente, o que evidencia o grande impacto da sílica coloidal na composição do concreto, visto que se mostra eficaz na redução dos poros do concreto, resultando em uma estrutura mais compacta e com melhores propriedades mecânicas (BERNARDO, 2024).

Figura 23 – Microestrutura do concreto com sílica coloidal.



Fonte: Adaptado de BERNARDO (2024).

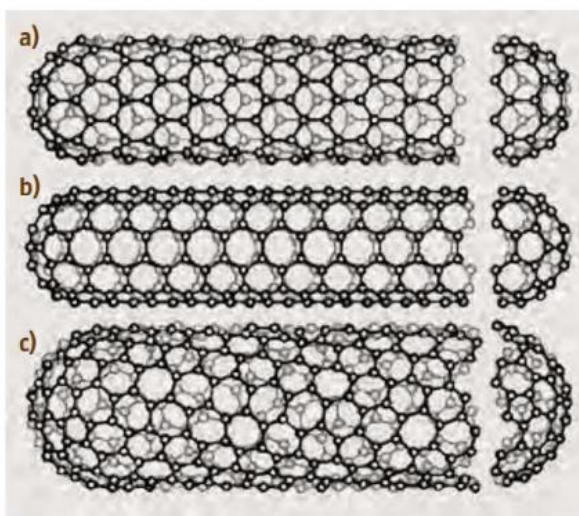
É importante destacar que há uma grande incerteza sobre o teor ideal de sílica coloidal a ser adicionado na mistura de concreto, devido aos resultados variados encontrados na literatura. No entanto, a adição de pequenas quantidades (0,3% a 0,9%) pode melhorar a microestrutura do concreto, graças aos efeitos pozolânico e nano-filler da sílica coloidal, principalmente na zona de transição. Isso resulta em menor porosidade, redução na penetração de íons cloreto e na absorção de água, aumentando a durabilidade e resistência do concreto (BERNARDO, 2024).

A utilização de nanosílica no concreto não só melhora a resistência, mas também reduz a liberação de gás carbônico, beneficiando o meio ambiente. Isso faz dela uma alternativa vantajosa, combinando qualidade estrutural, resistência e sustentabilidade (SOARES, *et al.*, 2023).

Os Nanotubos de Carbono (NTC) são estruturas tubulares formadas por folhas de grafeno, uma camada única de átomos de carbono dispostos em arranjo hexagonal. Com diâmetros na escala de nanômetros, os NTC apresentam propriedades excepcionais, como alta

resistência à tração, módulo de elasticidade e condutividade elétrica, superiores aos materiais tradicionais. Essas qualidades possibilitam o uso dos NTC em matrizes cimentícias, melhorando suas propriedades mecânicas e sua resistência à propagação de fissuras (LADEIRA, 2017; PINTO, 2022). Os NTC podem ser classificados conforme a direção de enrolamento (quiralidade) em três tipos: zig-zag, armchair e chiral, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Três tipos de quiralidade: (a) zig-zag, (b) armchair e (c) chiral



Fonte: LADEIRA, 2017.

A dispersão adequada dos Nanotubos de Carbono (NTC) na pasta de cimento é desafiadora devido à sua hidrofobicidade e tendência a se agregar. Métodos como o uso de agentes dispersantes e banho ultrassônico, além da síntese direta de NTC sobre o clínquer de cimento, podem melhorar essa dispersão. Quando bem dispersos, os NTC aumentam a resistência à tração e a resiliência da matriz cimentícia, favorecendo o desempenho mecânico do material (; LADEIRA, 2017; PINTO, 2022).

A adição de NTC ao concreto contribui para o controle da fissuração, dificultando a propagação de fissuras e formando pontes de aderência que aumentam a resistência mecânica, reduzem a porosidade e melhoram a durabilidade da matriz cimentícia, visto que os NTC agem como "costura" nas fissuras, funcionando como pontes de transferência de tensões (LADEIRA, 2017). Além disso, o NTC exerce um efeito filler, refinando os poros e diminuindo o volume e o diâmetro dos poros, o que reduz a difusão de cloretos e CO_2 , minimizando a corrosão (LADEIRA, 2017; PINTO, 2022). No entanto, a adição de NTC também aumenta a

condutividade elétrica do concreto, o que exige uma avaliação cuidadosa sobre os efeitos no processo corrosivo, uma vez que ele depende da condução elétrica do material (PINTO, 2022).

3.3 AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas compostas principalmente por ferro (Fe) e por um teor mínimo de 12% de cromo (Cr), o que os torna distintos dos aços-carbono em termos de propriedades, custo e, especialmente, resistência à corrosão. A resistência à corrosão, especialmente à corrosão por pite, é aprimorada devido à formação, na presença de oxigênio, de uma camada passiva de óxidos de cromo, a qual é contínua, insolúvel e não porosa, impedindo a interação do metal com ambientes agressivos (ARAUJO, MOREIRA & PANOSSIAN, 2014).

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias distintas, com base na composição química e na microestrutura do aço: austeníticos, martensíticos, ferríticos, endurecíveis por precipitação e dúplex. Os aços austeníticos e dúplex são os mais utilizados na construção civil, especialmente em estruturas localizadas em ambientes marinhos, que estão sujeitas à ação dos íons cloreto (ARAUJO, MOREIRA & PANOSSIAN, 2014).

Assim, o uso de aços inoxidáveis em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos garante maior durabilidade, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenções corretivas (TULA & HELENE, 1996).

Em contrapartida, os materiais empregados na liga metálica elevam o custo dos aços inoxidáveis, sendo essencial realizar um estudo de viabilidade econômica para determinar o tipo de armadura que melhor atenda às condições de projeto e viabilidade financeira em cada situação (TULA & HELENE, 1996). Esse custo adicional impacta no valor inicial da construção, podendo aumentar até cerca de 15%, embora esse aumento possa ser reduzido se o uso do aço inoxidável for restrito a elementos de concreto armado expostos a condições extremamente agressivas ou se a espessura do concreto de cobrimento for diminuída, o que representa uma das limitações de seu uso (ARAUJO, MOREIRA & PANOSSIAN, 2014). O aumento de custo depende do tipo de aço inoxidável utilizado e da quantidade de aço inoxidável substituindo o aço carbono no projeto. Como essa metodologia é geralmente aplicada em obras de alto custo de execução, o aumento no custo do aço representa apenas uma pequena parte do custo total inicial (TULA & HELENE, 1996).

Considerando que essa tecnologia ainda é recente, existem aspectos que precisam ser mais estudados, como o comportamento dos aços inoxidáveis diante das variações de temperatura nas diferentes estações ou em caso de incêndio, além da corrosão sob tensão, que acontece quando o aço inoxidável é tracionado na presença de elevados teores de cloretos e altas temperaturas (TULA & HELENE, 1996). Além disso, há a necessidade de estudos sobre a possível corrosão galvânica causada pelo contato elétrico entre barras de aço-carbono e aço inoxidável no concreto, que é utilizado principalmente nas áreas de maior corrosão e gera um par galvânico com o aço-carbono presente no restante do projeto (ARAÚJO, MOREIRA & PANOSSIAN, 2014).

Em resumo, devido às suas propriedades e custo, o uso de aço inoxidável é mais restrito a ambientes com alta agressividade ambiental, como em ambientes industriais severos, em pontes e armaduras de conexão entre juntas, ou no meio marinho, onde ocorre respingos de maré (ARARUNA, 2023).

3.4 ADITIVOS INIBIDORES DE CORROSÃO

Os inibidores de corrosão são substâncias químicas que, quando aplicadas em concentrações adequadas, protegem a armadura do aço, formando uma camada de óxidos que a defende de agentes agressivos, ou atuam na recuperação da camada passivadora, diminuindo a taxa de corrosão. Essa proteção ocorre por meio de uma reação que impede a penetração de cloretos, controlando a corrosão e evitando a formação de produtos expansivos, o que contribui para a durabilidade do material (MEDEIROS, *et al.*, 2002; VIEIRA, *et al.*, 2010; SCHMOELLER & LIMA, 2021).

Os aditivos inibidores de corrosão são frequentemente usados como método preventivo para proteger o concreto armado, mas também podem ser aplicados em estruturas já afetadas pela corrosão. Esses produtos podem ser aplicados diretamente na superfície do concreto ou incorporados ao concreto durante o amassamento, atuando por migração quando aplicados no concreto endurecido. Dessa forma, eles ajudam a proteger a estrutura contra a progressão da corrosão, oferecendo uma solução eficaz tanto para a prevenção quanto para a recuperação de estruturas degradadas (MEDEIROS, *et al.*, 2002; SCHMOELLER & LIMA, 2021).

Além de sua aplicação preventiva, os inibidores de corrosão também são utilizados como aditivos restauradores em estruturas de concreto já afetadas pela corrosão. Em

construções novas, são adicionados à mistura do concreto fresco para retardar o início da corrosão e reduzir a sua taxa após a despassivação da armadura (SCHMOELLER & LIMA, 2021). A vantagem de sua utilização está na facilidade de aplicação, uma vez que não exige mão-de-obra especializada e pode ser incorporado à água de amassamento, exigindo apenas controle da homogeneidade e da dosagem do concreto (MEDEIROS et. al, 2002). Em construções existentes, os inibidores também podem ser usados em argamassas e concretos de reparo, aplicados na superfície ou em sulcos para acelerar sua difusão (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

A eficácia dos inibidores de corrosão depende de diversos fatores, como a qualidade do concreto, a correta avaliação da agressividade do ambiente, uma adequada projeção da estrutura e condições operacionais apropriadas. Os inibidores devem ser eficazes em meios alcalinos, sem alterar significativamente as propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto, garantindo, assim, o bom desempenho do sistema de proteção contra a corrosão (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

Uma das vantagens dos inibidores de corrosão é que, assim como outros aditivos, não exigem manutenção constante e possuem um custo relativamente baixo. No entanto, em casos de corrosão provocada pela penetração de cloretos, chega-se a um ponto em que a quantidade de inibidor não é mais suficiente para conter a ação dos cloretos, o que pode resultar no início da corrosão das armaduras (MEDEIROS, *et al.*, 2002).

Os inibidores de corrosão podem ser classificados conforme sua composição química, mecanismo de proteção e forma de aplicação. Em relação à composição química, existem três tipos principais. Os inibidores orgânicos atuam formando uma película protetora sobre o aço, que impede as reações anódicas e catódicas responsáveis pelos processos de corrosão, além de bloquear a entrada de cloretos e oxigênio, alguns exemplos incluem as aminas e os carboxilatos (SCHMOELLER & LIMA, 2021). Já os inibidores inorgânicos, como o fosfato de sódio e o nitrito de cálcio, atuam de maneiras distintas: o fosfato de sódio inibe a corrosão por pite quando sua concentração é equivalente à de cloretos, enquanto o nitrito de cálcio modifica as propriedades superficiais do aço, atuando como acelerador de pega e endurecimento e melhorando a resistência à compressão. Também há o nitrito de sódio que é eficaz, sem afetar significativamente as propriedades físico-químicas do concreto, mas pode prejudicar a resistência à compressão e estimular a corrosão por pites com o aumento da temperatura. Além disso, os inibidores naturais são derivados de fontes naturais, como extratos de folhas, cascas,

frutos e sementes de plantas, e têm mostrado eficácia na resistência à corrosão, além de serem ecologicamente corretos, contribuindo para a redução de resíduos e para o uso mais eficiente dos recursos naturais (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

Os inibidores de corrosão podem ser classificados quanto ao seu mecanismo de proteção. Inibidores anódicos atuando para retardar as reações no ânodo, reagindo com o produto de corrosão formado inicialmente e criando um filme aderente e insolúvel na superfície do aço, o que aumenta a polarização anódica e proporciona proteção contra a corrosão (MEDEIROS, *et al.*, 2002; SCHMOELLER & LIMA, 2021). Esses inibidores são divididos em dois tipos: os íons não oxidantes, que necessitam de oxigênio para passivar o aço, e os ânions oxidantes, que passivam o aço independentemente da presença de oxigênio, como, por exemplo, os molibdados, nitratos, cromatos, ortofosfatos e benzoatos (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

É importante controlar a quantidade de inibidor anódico aplicada, pois cada substância possui uma concentração crítica, abaixo da qual a proteção não será eficaz. Se a concentração for inferior ao valor crítico, o filme protetor não se formará adequadamente, resultando em corrosão localizada nas áreas não protegidas (MEDEIROS, *et al.*, 2002).

Os inibidores catódicos atuam reprimindo a reação no cátodo, formando compostos insolúveis que bloqueiam a difusão de oxigênio e a condução de elétrons. Embora sejam eficazes, são menos eficientes do que os inibidores anódicos, sendo mais comuns os carbonatos, silicatos, fosfatos, óxido de zinco e polifosfatos. São considerados inibidores seguros porque, mesmo em concentrações insuficientes, provocam uma corrosão uniforme no aço, sem causar danos localizados, garantindo uma proteção mais ampla (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

Por outro lado, os inibidores mistos provocam reações inibidoras tanto no ânodo quanto no cátodo, reduzindo a taxa de corrosão sem alterar significativamente o potencial de corrosão. Esses inibidores quando insuficientes, garantem uma corrosão uniforme, sem danificar a estrutura, resultando apenas em um sistema não inibido (MEDEIROS *et. al.*, 2002).

A escolha do inibidor de corrosão depende de fatores como tipo de metal, composição, pH, temperatura, facilidade de mistura, impurezas e custo. A eficiência desses inibidores está vinculada a alguns aspectos, como a identificação das causas da corrosão no sistema, o custo de aplicação, as propriedades e mecanismos de ação dos inibidores e as condições adequadas para a sua adição e controle.

O custo é um fator limitante importante, especialmente em estruturas de concreto armado, como no caso do nitrato de sódio, que pode ser viável para estruturas de longa vida útil, como pontes e viadutos. Isso porque, embora o custo inicial seja alto, o benefício de reduzir a necessidade de intervenções e manutenção ao longo da vida útil pode justificar seu uso (MEDEIROS, *et al.*, 2002).

Além disso, a aplicação da quantidade correta de inibidor é crucial, principalmente para os inibidores anódicos, pois uma concentração abaixo da crítica impede a formação do produto protetor, resultando em corrosão localizada nas áreas não protegidas. A avaliação da performance dos inibidores em estruturas reais é complexa, pois as condições ambientais variáveis, como umidade e resistividade do concreto, podem alterar as medições de potencial de corrosão, dificultando a interpretação dos resultados (SCHMOELLER & LIMA, 2021).

A utilização de inibidores de corrosão em concreto deve ser cuidadosamente avaliada, especialmente quanto à sua influência nas propriedades do material, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Embora a principal função dos inibidores seja reduzir a corrosão, seu efeito nas características do concreto não pode ser negligenciado.

A interação desses inibidores com a pasta de cimento e a hidratação do material pode, inclusive, contribuir para o aumento da resistência à compressão do concreto, alterando a estrutura da pasta. Eles tendem a reduzir o módulo de elasticidade, o que implica na melhora do concreto, permitindo que ele absorva mais deformações antes de apresentar fissuras (VIEIRA *et. al*, 2010). Esses efeitos podem resultar no desenvolvimento de concretos mais duráveis e resistentes, melhorando a performance da estrutura ao longo do tempo.

3.5 SENSORES GALVÂNICOS DE MONITORAMENTO

O monitoramento das estruturas de concreto armado por meio de sensores permite estimar o risco de corrosão ao longo do tempo, proporcionando uma gestão mais eficaz da integridade das construções. Com a detecção antecipada desse risco, é possível planejar intervenções preventivas ou de controle da corrosão, garantindo que as ações corretivas sejam realizadas nos momentos mais adequados e contribuindo para a preservação das estruturas e redução de custos com manutenções emergenciais (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

Esses sensores são particularmente úteis em ambientes agressivos, como nas estruturas marítimas. Posicionados estrategicamente em áreas de difícil acesso, como a região livre de cobrimento do concreto, eles são capazes de identificar o momento exato em que a armadura despassiva e a corrosão é ativada, o que melhora a previsão da vida útil das estruturas e amplia o entendimento sobre a durabilidade do concreto, complementando outros sistemas de proteção (DÍAZ et. al, 2022).

O conhecimento aprofundado do comportamento das estruturas ao longo do tempo permite a utilização de dados em modelos matemáticos precisos para prever sua vida útil, possibilitando a avaliação de diferentes cenários, como alterações no tratamento superficial, troca de materiais ou interrupção da proteção catódica. Essa abordagem também contribui para a otimização do planejamento de inspeções e reparos, considerando aspectos como interrupções de tráfego e instalações de infraestrutura de apoio, além da coleta de testemunhos dos componentes da estrutura. Como resultado, ocorre uma significativa redução de custos e um aumento no tempo de conservação do aspecto estético original da estrutura (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

Os sensores são utilizados para monitorar o risco de corrosão em estruturas novas, posicionados sobre as armaduras antes da concretagem, e em estruturas existentes, inseridos em furos ao longo da espessura do concreto de cobrimento da armadura. Eles são eficazes em estruturas já existentes que podem atingir rapidamente um estado crítico de deterioração, permitindo, além do monitoramento da corrosão, a medição de sua taxa e a avaliação da durabilidade dos reparos. Esse monitoramento pode ser realizado também em estruturas atmosféricas, enterradas ou submersas, sendo mais comum em estruturas atmosféricas, onde os sensores são embutidos em componentes expostos a ambientes agressivos, sendo a escolha do tipo de sensor e a análise dos dados dependentes das características da estrutura e das condições ambientais (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

Existem diversos tipos de sensores, como os de umidade, os de taxa de corrosão instantânea e os galvânicos, que serão explicados com mais detalhes.

Os sensores galvânicos monitoram a variação da corrente galvânica, que ocorre quando dois metais distintos ou similares em estados diferentes (ativo ou passivo) entram em contato elétrico em um mesmo meio condutivo. Em concreto íntegro, a corrente é muito baixa devido ao estado passivo das barras de aço-carbono, que apresentam uma diferença de potencial

desprezível. Porém, quando a corrosão se inicia, a corrente galvânica aumenta devido à alteração do potencial do ânodo, tornando-se mais negativo em relação ao estado passivo (VALDÉS; ROQUE & MEDEIROS, 2017). Esse tipo de sensor mede a corrente gerada entre um ânodo corrosivo e um cátodo passivo, fornecendo dados sobre a corrosão provocada pela redução catódica, sem considerar a corrosão anódica (DÍAZ, *et al.*, 2022).

O monitoramento e a avaliação do risco de corrosão em estruturas de concreto armado são viabilizados pela boa correlação entre as tensões das macrocélulas formadas entre o aço carbono e o aço inoxidável e os potenciais de corrosão medidos pelo sensor Cu/CuSO₄ ao longo do tempo de ensaio (DÍAZ, *et al.*, 2022). Esses sensores se mostram eficazes como método preventivo, uma vez que apresentaram valores de corrente e densidade de corrente semelhantes aos observados em sistemas semelhantes. A medição da corrente galvânica ocorre por meio do contato elétrico entre uma barra de aço-carbono e uma barra de metal mais nobre ou, na ausência desta, entre o sensor e a armadura (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

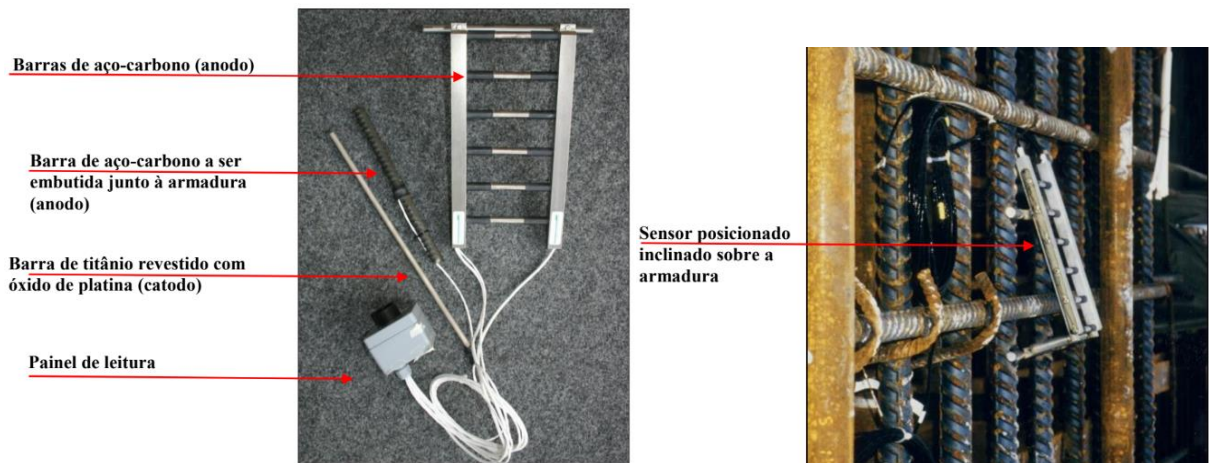
Na avaliação do risco de corrosão em estruturas de concreto, os sensores galvânicos são compostos por barras de aço-carbono eletricamente isoladas, que são embutidas no concreto e posicionadas em diferentes profundidades, sempre inferiores à profundidade da armadura. Essas barras, que fazem parte do sensor, são denominadas ânodos (VALDÉS; ROQUE & MEDEIROS, 2017). Já a barra de metal mais nobre, denominada cátodo, é embutida na proximidade do ânodo do sensor, sendo, em geral, composta por aços inoxidáveis ou titânio revestido com platina ou mistura de óxidos de metais nobres (MMO) (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

O processo de corrosão nas barras do ânodo ocorre conforme os agentes agressivos, como dióxido de carbono ou íons cloretos, avançam no concreto. Esse avanço diminui o pH da solução de poros (carbonatação) ou atinge níveis críticos de cloretos, o que aumenta a corrente galvânica entre as barras do sensor, daquelas mais próximas à superfície do concreto até as mais profundas. A resistividade elétrica, influenciada pela umidade do concreto e o conteúdo do eletrólito, também é um parâmetro relevante, sendo determinada pela técnica de quatro pinos (Wenner) ou, com modificações, pelos sensores galvânicos. Além disso, esses sensores possibilitam a medição do potencial de circuito aberto, da taxa de corrosão instantânea e da temperatura do concreto, utilizando voltímetros de alta impedância e eletrodos de referência, como os de prata/cloreto de prata ou manganês/óxido de manganês, ou ainda, o próprio cátodo do sensor (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

Portanto, a análise do risco de corrosão é realizada com a medição da corrente galvânica e do potencial de circuito aberto, sendo que o aumento da corrente galvânica e a diminuição do potencial indicam que níveis críticos de corrosão foram atingidos, como a carbonatação ou o ingresso de cloretos (ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013).

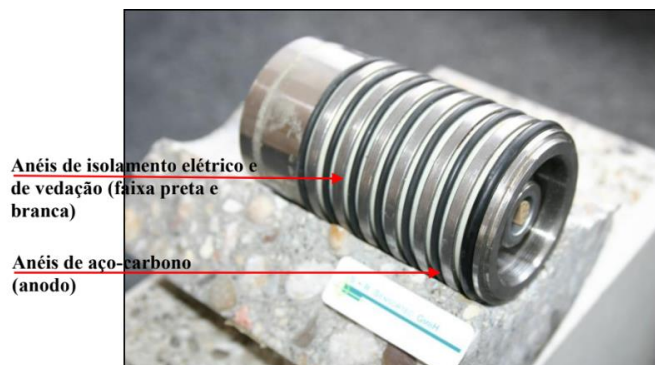
Alguns sensores disponíveis no mercado para monitoramento de corrosão em estruturas de concreto incluem o sensor escada (Anode Ladder) (Figura 25), o sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode) (Figura 26), o sensor de múltiplos eletrodos (CorroWatch Multisensor) (Figura 27) e o sensor 900 (Concrete Multi-depth Sensor, Model 900) (Figura 28).

Figura 25 – Sensor escada (Anode Ladder).



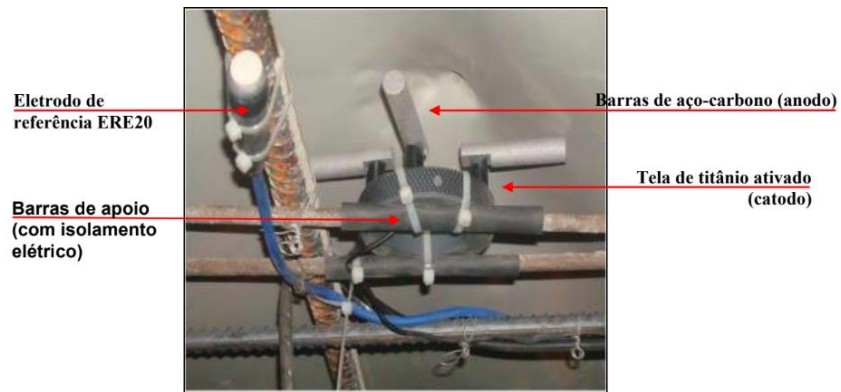
Fonte: ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013.

Figura 26 – Sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode).



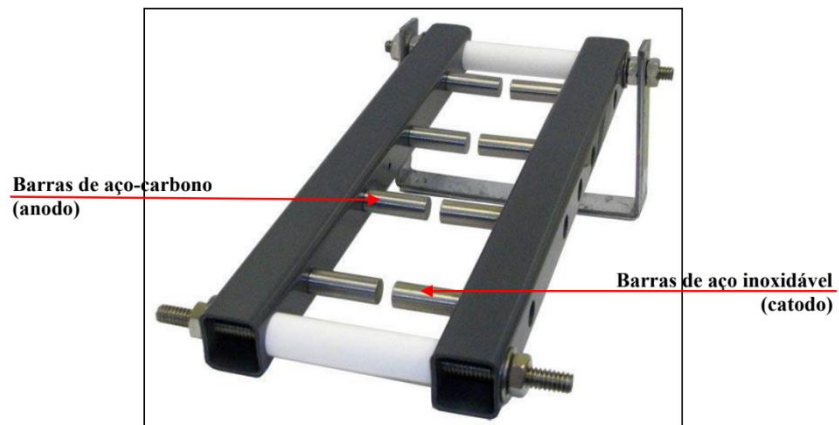
Fonte: ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013.

Figura 27 – Sensor de múltiplos eletrodos (CorroWatch Multisensor).



Fonte: ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013.

Figura 28 – Sensor 900 (Concrete Multi-depth Sensor, Model 900).



Fonte: ARAÚJO; ALMEIDA & PANOSSIAN, 2013.

4 PERFIL SUSTENTÁVEL DAS TECNOLOGIAS

A construção sustentável refere-se à criação e manutenção de ambientes construídos de maneira responsável, com foco na saúde e no bem-estar dos seus ocupantes, ao mesmo tempo em que promove a utilização eficiente dos recursos naturais e segue princípios ecológicos (TORGAL & JALALI, 2010). Assim, à medida que os edifícios se tornam mais eficientes energeticamente, a importância dos materiais de construção cresce significativamente, visto que esses materiais também têm um impacto direto na sustentabilidade global das construções, afetando aspectos como durabilidade, conforto e saúde dos ocupantes. Portanto, a seleção criteriosa dos materiais torna-se essencial, justificando a necessidade de maior atenção às características desses recursos, que devem ser escolhidos de maneira a reduzir os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida da construção.

As inovações tecnológicas desempenham um papel crucial na sustentabilidade das construções, uma vez que a introdução de novas técnicas, processos e materiais mais eficientes e com menor impacto ambiental, tem o potencial de transformar a forma como os edifícios são projetados e construídos. A construção sustentável se beneficia diretamente dessas inovações, promovendo ambientes mais ecológicos, eficientes e duráveis, alinhados com a redução de impactos ambientais e a otimização de recursos ao longo do ciclo de vida dos edifícios.

A análise do perfil sustentável das tecnologias apresentadas foi baseada nos aspectos econômico, social e ambiental. A dimensão econômica está relacionada à viabilidade financeira, com o objetivo de garantir baixos custos tanto na implementação quanto na manutenção.

A dimensão social, por sua vez, abrange a responsabilidade social, levando em conta aspectos como segurança, melhoria da qualidade de vida para a sociedade e do ambiente de trabalho dos operários da construção, promovendo o bem-estar coletivo, além da aceitabilidade da população.

Já a dimensão ambiental foca nos impactos ao meio ambiente, com a avaliação do desempenho ambiental voltada para a qualidade do ambiente, a redução da geração de resíduos e poluição, e a minimização do desperdício, buscando evitar o acúmulo de resíduos em aterros sanitários e lixões (LIBRELOTTO, 2005).

A classificação dos indicadores sustentáveis foi realizada com base em um sistema de cores, no qual o verde representa que o objetivo sustentável foi amplamente atendido, indicando um desempenho positivo da tecnologia em relação ao critério avaliado. A cor amarela sinaliza a necessidade de atenção devido a certas desvantagens do material, que podem comprometer parcialmente sua eficiência sustentável. Já a cor vermelha indica que a tecnologia não atende ao indicador, apresentando uma alta desvantagem em relação ao critério avaliado, podendo impactar negativamente a viabilidade sustentável da solução. Esse método de categorização permite uma análise clara e objetiva do desempenho das diferentes tecnologias, facilitando a identificação de seus impactos sustentáveis.

Desse modo, na Tabela 2 estão apresentados os indicadores sustentáveis, bem como as vantagens e desvantagens, da utilização das tecnologias apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 2 – Resumo das inovações tecnológicas empregadas para inibição da corrosão de armaduras.

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem	Indicadores Sustentáveis		
			Ambiental	Social	Econômico
Concreto Autocicatrizante	Impede a penetração de água e outros agentes agressivos. Eficiente em locais de difícil acesso.	Alto custo. Limitação de reparo. Desempenho limitado ao longo do tempo.			
Concreto com Nanotecnologia	Densificação da Microestrutura. Menor difusão de agentes agressivos, como íons cloreto e CO ₂ .	Dificuldades na dispersão dos nanomateriais e na definição do teor correto a ser utilizado.			
Aço Inoxidável	Alta resistência a corrosão. Utilizado em ambientes extremamente agressivos. Redução do risco de corrosão localizada.	Alto custo inicial. Falta de estudos sobre a compatibilidade com outros materiais.			
Aditivos Inibidores de Corrosão	Facilidade de aplicação. Menor necessidade de impermeabilizar a estrutura. Proteção em áreas de difícil acesso. Ganho de resistência à compressão.	Necessidade de controle rigoroso de dosagem. Efeito limitado em alguns tipos de corrosão, como por cloretos, e em corrosão avançada.			
Sensores Galvânicos de Monitoramento	Monitoramento contínuo. Fácil aplicabilidade. Indicação precoce de corrosão.	Necessidade de calibração. Sensibilidade a condições ambientais variáveis.			

Fonte: A autora.

Analisando a Tabela 2 constata-se:

- O uso do concreto autocicatrizante em estruturas de concreto armado apresenta um desempenho moderado em termos de sustentabilidade, sendo classificado como amarelo para os indicadores ambiental, econômico e social. Ambientalmente, contribui para a redução de resíduos e o prolongamento da vida útil das estruturas, minimizando a necessidade de reparos frequentes e a extração de novos recursos naturais. No entanto, sua produção inicial resulta em emissões de CO₂, e o uso de aditivos pode gerar impactos ambientais, ainda que menores ao longo do tempo. Economicamente, reduz custos de manutenção e reparo a longo prazo, mas o alto investimento inicial pode limitar sua adoção. Socialmente, a tecnologia melhora a segurança estrutural, reduzindo riscos de falhas, mas sua implementação enfrenta desafios como a necessidade de mão de obra qualificada e a viabilidade de aplicação em larga escala. Dessa forma, observa-se que o concreto autocicatrizante possui vantagens sustentáveis, mas ainda demanda estudos e aprimoramentos para atender de forma mais abrangente a todos os indicadores sustentáveis.
- O uso de concretos com nanomateriais, como nanosílica e nanotubos de carbono (NTC), apresenta um alto desempenho ambiental, sendo classificado como verde nesse indicador, pois reduz a necessidade de manutenção, minimiza o desperdício de recursos e contribui para a diminuição da emissão de CO₂, promovendo a preservação do meio ambiente. Socialmente, a tecnologia melhora a segurança e a durabilidade das estruturas, porém sua aplicação exige especialização técnica para sua implementação, o que pode limitar sua acessibilidade. No aspecto econômico, apesar de proporcionar economia a longo prazo devido à maior vida útil e à redução de reparos, seu custo inicial elevado e a necessidade de equipamentos especializados tornam sua implementação de difícil viabilidade econômica. Dessa forma, os concretos com nanomateriais apresentam benefícios significativos para a sustentabilidade ambiental, mas ainda enfrentam barreiras sociais e econômicas que demandam estudos e avanços para ampliar sua viabilidade.

- O uso de aço inoxidável em armaduras de concreto armado apresenta um desempenho positivo no aspecto social, sendo classificado como verde nesse indicador, pois melhora a qualidade de vida das comunidades ao reduzir a necessidade de intervenções frequentes que impactam o cotidiano das pessoas. Além disso, sua aplicação não enfrenta barreiras de aceitação, uma vez que mantém o mesmo sistema construtivo, alterando apenas o material utilizado. No entanto, ambientalmente, essa tecnologia é classificada como vermelha, pois, apesar de aumentar a durabilidade das estruturas e minimizar a necessidade de reparos, seu processo de fabricação é mais complexo e exige mais energia do que o aço carbono, o que resulta em emissões significativas de CO e CO₂. Do ponto de vista econômico, também recebe a classificação vermelha, já que seu custo inicial elevado representa um grande desafio financeiro, tornando sua adoção limitada quando comparada a outras soluções mais acessíveis.
- Os aditivos inibidores de corrosão em concreto armado desempenham um papel positivo na durabilidade das estruturas, com destaque para o aspecto social, no qual são classificados como verdes. Eles aumentam a segurança das construções ao prevenir a corrosão das armaduras, prolongando a vida útil das edificações e reduzindo o risco de falhas estruturais, além de serem de fácil aplicação. No entanto, apresentam classificação amarela nos indicadores ambiental e econômico. Do ponto de vista ambiental, ajudam a diminuir a necessidade de reparos frequentes, reduzindo a geração de resíduos e o consumo de novos materiais. Contudo, a sustentabilidade desses aditivos pode variar conforme sua composição, pois alguns compostos podem gerar impactos negativos, como a liberação de substâncias tóxicas ou o uso de materiais não biodegradáveis. No aspecto econômico, sua aplicação possibilita economia a longo prazo ao minimizar custos com manutenções emergenciais, mas o investimento inicial pode ser elevado, e a variação de preços entre os diferentes tipos de aditivos influencia sua viabilidade financeira.
- Os sensores galvânicos para monitoramento de corrosão em armaduras de concreto armado apresentam um desempenho sustentável significativo nos aspectos social e ambiental, sendo classificados como verdes nesses indicadores. Socialmente, eles aumentam a segurança das construções ao permitir o monitoramento contínuo da integridade estrutural, prevenindo falhas que poderiam comprometer vidas. Além disso,

sua implementação não enfrenta grandes barreiras de aceitação, embora a necessidade de treinamento especializado possa dificultar sua adoção por empresas menores. No aspecto ambiental, esses sensores contribuem para a redução do impacto das manutenções, evitando reparos excessivos, desperdício de materiais e a necessidade de grandes reformas. No entanto, sua eficácia pode ser reduzida em ambientes extremamente agressivos. Do ponto de vista econômico, são classificados como amarelos, pois, apesar de proporcionarem economia a longo prazo ao reduzir custos com manutenções emergenciais e prolongar a vida útil das estruturas, seu custo inicial elevado, a necessidade de manutenção periódica e a calibração constante representam desafios, especialmente para projetos de menor porte.

Ao avaliar as diferentes tecnologias voltadas à mitigação da corrosão, verifica-se que cada abordagem apresenta vantagens e desafios distintos. Algumas soluções oferecem alta durabilidade e baixa necessidade de manutenção, mas possuem custos elevados ou exigem condições específicas para sua eficácia. Outras são economicamente viáveis e de fácil aplicação, porém podem demandar monitoramento contínuo ou apresentar eficiência variável dependendo do ambiente de exposição.

Dessa forma, a escolha da tecnologia mais adequada deve considerar sua viabilidade econômica, impacto ambiental e desempenho estrutural a longo prazo. A definição da solução mais eficiente para cada caso exige uma análise criteriosa dos indicadores sustentáveis e das particularidades de cada projeto, buscando equilibrar custo, durabilidade e redução de impactos ambientais. A integração de múltiplas abordagens pode ser uma estratégia viável para garantir edificações mais seguras e sustentáveis, minimizando a necessidade de intervenções corretivas e contribuindo para uma construção mais eficiente, durável e sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou o impacto da corrosão em estruturas de concreto armado e algumas das tecnologias disponíveis para mitigar esse problema, enfatizando a importância da sustentabilidade e da durabilidade das edificações. A corrosão compromete a integridade das construções, aumenta os custos de manutenção e gera impactos ambientais significativos, tornando essencial a busca por soluções inovadoras que garantam maior durabilidade e menor desperdício de recursos.

A análise realizada demonstra que não há uma única solução definitiva para a corrosão, tendo em vista que cada tecnologia apresenta vantagens e desafios específicos. O concreto autocicatrizante, a nanotecnologia e os sensores de monitoramento se destacam por sua eficiência na prevenção e detecção precoce da corrosão, mas enfrentam desafios em termos de custo e escalabilidade. O uso de aços inoxidáveis é altamente eficaz, porém seu elevado custo limita sua aplicação em larga escala. Os aditivos inibidores de corrosão surgem como uma alternativa acessível, mas sua eficiência depende de fatores ambientais e do tipo de estrutura. Dessa forma, a escolha da tecnologia ideal deve considerar sua viabilidade econômica e sustentabilidade para cada situação específica. Não se trata apenas de selecionar a solução mais avançada tecnologicamente, mas sim de identificar a alternativa que melhor equilibre custo, eficiência e impacto ambiental ao longo do ciclo de vida da edificação.

Diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para a reparação e prevenção da corrosão em estruturas de concreto além das analisadas nesse trabalho, como o concreto auto-adensável (CAA), proteção catódica avançada, compostos poliméricos, recobrimento superficial avançado, impregnação com íons de lítio e reparo eletroquímico. Portanto, é fundamental que os estudos sobre essas tecnologias sejam contínuos, buscando aprimorar suas aplicações, reduzir custos e melhorar sua eficiência a longo prazo. A evolução das pesquisas permitirá a identificação de soluções mais eficazes e acessíveis, promovendo um avanço significativo na durabilidade das construções e na mitigação dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. J. de O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001, 256 p.
- ARARUNA, J. C. M. Prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão da armadura: revisão de literatura. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 60, n. 4, p. 1339–1358, 2023.
- ARAÚJO, A. de; ALMEIDA, N. L. de; PANOSSIAN, Z. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto com uso de sensores. In: **COTEQ – 12º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**, 2013.
- ARAUJO, A. de; MOREIRA, A. R.; PANOSSIAN, Z. Extensão da vida útil das estruturas de concreto com uso de armaduras de aço-carbono revestidas ou de aço inoxidável. In: **INTERCORR 2014 – ABRACO**, São Paulo: USP, 15 p., 2014
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- BARRETTO, T. C. M.; PARENTE, I. M. da S. Distintas formas de corrosão das armaduras de estruturas em concreto armado: uma revisão. In: **INTERCORR 2018 – ABRACO**, São Paulo: USP, 11 p., 2018.
- BERNARDO, L. M. **Nanotecnologia aplicada a materiais da construção civil matrizes cimentícias**. Dissertação de mestrado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2024, 96 p.
- CARDOSO, D. F.; SILVA, L. C da; PIRES, R. C. S. Recuperação de estruturas de concreto armado submetidas à corrosão. **ÂNGULOS – A Revista do CREA Rio**, 2022.
- CARVALHO, R. F. de. **Diagnóstico de corrosão em pilares de concreto armado: uma análise comparativa utilizando três métodos de verificação**. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023, 62 p.

COSTA, J. M. *et al.* Análise patológica através do ensaio não destrutivo utilizando resistividade elétrica superficial do concreto. **Revista CONSTUINDO**, Belo Horizonte, v. 9, Ed. Esp. de Patologia, p. 25 – 35, 2017.

DANTAS NETO, J. A. *et al.* Aplicação da termografia infravermelha na identificação de manifestações patológicas nas construções. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT 2020**, p. 2084-2090, 2020.

DÍAZ, J. L. P. *et al.* Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto. **Revista ALCONPAT**, v. 13, n. 3, 2022.

DOURADO, D. R. *et al.* Métodos de recuperação, proteção e monitoramento de estruturas de concreto armado em processo de corrosão: revisão de literatura. In: **RECIMA21 -Ciências Exatas e da Terra, Sociais, da Saúde, Humanas e Engenharia/Tecnologia**, v.3, n.9, 2022.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. **Corrosión de armadura de estructuras de hormigón**. Boletín Técnico 06, Alconpat Internacional, 2013.

HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese para obtenção do título de Professor Livre Docente. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993, 231 p.

LADEIRA, L. O. **Resistência à tração e à carbonatação de argamassas fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 123p.

LIBRELOTTO, L. I. **Modelo para avaliação da sustentabilidade na construção civil nas dimensões econômica, social e ambiental (ESA): aplicação no setor de edificações**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, 335 p.

LIMA, M. dos S. **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 57 p., 2021.

MARTINS, D. K. G. Corrosão de armaduras em concreto armado. **Revista CONSTUINDO**, Belo Horizonte, v. 14, n. 02, p. 33 – 50, 2022.

MEDEIROS, M. H. F. de, *et al.* Utilização do nitrito de sódio como inibidor de corrosão em estruturas de concreto armado sujeitas a ação dos íons cloretos. **Revista Engenharia Civil (Universidade do Minho)**, Braga, v. 15, p. 19–28, 2002.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017, 130 p.

MENDEZ, B. M. G. *et al.* Concreto autocicatrizante: análise comparativa da regeneração em amostras com diferentes teores de perlita encapsuladas com silicato de sódio, In: **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT 2020**, p. 1946-1954, 2020.

OLIVEIRA, J. L. P de, *et al.* Estudo de caso: identificação de manifestações patológicas com o uso da termografia infravermelha. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT 2020**, p. 2136-2143, 2020.

PINTO, S. de A. **Influência de nanotubos de carbono (NTC) na durabilidade do concreto quanto à ação de cloretos**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2022, 146 p.

SCHIMIDT, B. C. *et al.* Utilização do concreto autocicatrizante e sua influência na corrosão das armaduras. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, 2022.

SCHMOELLER, F.; LIMA, M. G. de. Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão. **CONCRETO & Construções**, ed. 103, 2021.

SILVA, A. S. da S. *et. al.* Análise de estruturas por meio de investigações não destrutivas. **Facere Scientia**, v. 01, ed. 02, 2022.

SOARES, A. L. *et. al.* Nanotecnologia aplicada a materiais da construção civil matrizes cimentícias. **Revista FT, Engenharia Civil**, v. 27, ed. 128, 2023.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKAGI, E. M. *et al.* Rumo ao concreto do amanhã: concreto autocicatrizante ‘engenheirado’ com cimento de escória de alto forno ativado por aditivo cristalino (PRAH 4G). **Revista Estrutura**, 2018.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2 ed. Vila Verde: Gráfica Vilaverdense, 2010.

TULA, L.; HELENE, P. Emprego de armaduras de aço inoxidável para estruturas de concreto armado. In **REIBRAC: o estado da arte do concreto, tecnologia e qualidade na construção civil**, São Paulo: IBRACON, 1996.

VALDÉS, A. C.; ROQUE, P. de J.; MEDEIROS, M. H. F. Sensores de corrosão para monitoramento de pontes de concreto armado. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, ed. Especial, 2017.

VIEIRA, D. V. *et al.* Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado. **Revista Matéria**, v. 15, n. 3, p. 431 – 444, 2010.