



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gabryel Francisco Barros de Oliveira

**Estudo de caso sobre corrosão em estruturas de concreto armado em uma
residência unifamiliar, uma igreja e prédio multifamiliar localizados na cidade
de Pau dos Ferros - RN.**

PAU DOS FERROS – RN

2024

Gabryel Francisco Barros de Oliveira

Estudo de caso sobre corrosão em estruturas de concreto armado em uma residência unifamiliar, uma igreja e prédio multifamiliar localizados na cidade de Pau dos Ferros - RN.

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Josy Eliziane Torres Ramos

PAU DOS FERROS – RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

048e Oliveira, Gabryel Francisco Barros de.
Estudo de caso sobre corrosão em estruturas de concreto armado em uma residência unifamiliar, uma igreja e prédio multifamiliar localizados na cidade de Pau dos Ferros - RN. / Gabryel Francisco Barros de Oliveira. - 2024.
74 f. : il.

Orientadora: Josy Eliziane Torres Ramos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Administração, 2024.

1. Corrosão. 2. Concreto. 3. Carbonatação. 4. Cloretos. I. Eliziane Torres Ramos, Josy , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Gabryel Francisco Barros de Oliveira

Estudo de caso sobre Corrosão em Estruturas de Concreto Armado em uma residência unifamiliar, uma igreja e prédio multifamiliar localizados na cidade de Pau dos Ferros - RN.

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Josy Eliziane Torres Ramos

Defendida em: 24/10/2024

BANCA EXAMINADORA

JOSY ELIZIANE TORRES RAMOS (Presidente da Banca - Orientador(a))

KYTÉRIA SABINA LOPES DE FIGUEREDO (Docente Interno)

SANDERLIR SILVA DIAS (Docente Interno)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que esteve presente comigo em todos os momentos, me fornecendo forças e disposição para persistir, por providenciar tudo necessário para minha persistência, me dando paciência e resiliência para não desistir. Falta – me palavras para expressar a minha eterna gratidão ao Senhor, por me acompanhar em todas as ocasiões, por ser tão justo e compassivo comigo.

Aos meus pais e meus irmãos, por estarem ao meu lado todos esses anos, de forma bem especial à minha querida mãe e ao meu amado irmão por tanto companheirismo, paciência, incentivo e pela compreensão durante a minha ausência. Por estarem sempre torcendo por mim e desejando meu sucesso. Por tanto amor e carinho. Sou imensamente grato a Deus por tê-los em minha vida.

Aos meus amados sobrinhos, que só de existirem me tornaram mais feliz e me motivam a crescer profissionalmente para que eu possa, amar, proteger, prover e cuidar deles.

A minha namorada, Emiliane Pinheiro, por tanta cumplicidade ao longo desses anos, por toda compreensão, tristezas e felicidades compartilhadas. Por não desistir de mim, no momento mais difícil que passei aqui nessa universidade. Obrigada pela constante ajuda e por tanta parceria, zelo e carinho. Agradeço a Deus por sua vida e por me tornar seu companheiro.

Aos meus melhores amigos, Neto Alves e Rafael Lucas, por se fazerem presente nessa minha jornada, mesmo estando tão longe, muito obrigado por serem sempre fiéis, leais e por me abraçarem nos momentos bons e ruins do qual compartilhei com vocês. Sem vocês essa jornada teria sido muito mais difícil.

A minha orientadora Profa. Dra. Josy Eliziane Torres Ramos, que me acolheu com tanto carinho na Ufersa, por ter aceitado o assunto da pesquisa confiando no meu potencial, por toda preocupação do início ao fim das orientações, por ter compreendido minhas dificuldades, minhas dúvidas, e por sempre me incentivar

confiar e me fazer acreditar na minha capacidade. Sem sua atenção e dedicação este trabalho não seria possível.

Aos amigos e colegas que fiz na jornada acadêmica, de forma bem especial a Manoel Carvalho, Robson Ruan por toda lealdade e companheirismo, levarei vocês para a vida.

“Mude seus pensamentos e você mudará seu destino.”

Joseph Murphy

RESUMO

A corrosão de armaduras é um dos processos degradantes com maior incidência nas estruturas de concreto armado. Para que possa acontecer, a corrosão precisa de um conjunto de fatores que tornam o ambiente favorável, são eles: presença de água, de ar, área anódica, área catódica, um condutor metálico (armadura) e em eletrólito (solução aquosa existente no concreto). Este estudo analisou a corrosão presente nas estruturas de concreto armado em residências, prédio comerciais e alguns locais de muitas visitações na cidade de Pau dos Ferros/RN. Foram realizados estudos e pesquisas sobre o tema bem como visitas aos locais, para aprofundamento do estudo corrosivo nas estruturas, sendo assim evidenciado um estado de deterioração muito avançado, resultado de um processo corrosivo quem em ambos os casos se instauraram ao longo de alguns anos, ficando, de forma evidente a despassivação do aço por carbonatação e por cloretos provocando fissuras paralelas na direção das barras principais, fissuras paralelas na direção dos estribos e deslocamento da cobertura de concreto e exposição da armadura. A pesquisa neste estudo, proporcionou um entendimento aprofundado sobre os tipos de corrosão, sendo a mais comum em estruturas de concreto armado, a corrosão eletroquímica, mostrando fatores que potencializaram os danos provocados nas peças estruturais proporcionando uma melhor tomada de decisão. Como resultado, observa-se que a falta de entendimento sobre como o ocorre o processo corrosivo e a falta de mão de obra qualificada potencializam o não cumprimento da vida útil de projeto, prevista em norma, fazendo assim, com que obras recentes, já demonstrem muitas manifestações patológicas. Este estudo nos forneceu conhecimento suficiente para propor soluções adequadas capaz de prevenir e corrigir tais acontecimentos patológicos.

Palavras-chave: Corrosão, Concreto, Carbonatação, Cloretos, Patologia.

ABSTRACT

The corrosion of reinforcement bars is one of the most degrading processes affecting reinforced concrete structures. For corrosion to occur, a combination of factors must create a favorable environment: the presence of water, air, an anodic area, a cathodic area, a metallic conductor (reinforcement), and an electrolyte (aqueous solution present in the concrete). This study analyzed the corrosion found in reinforced concrete structures in residences, commercial buildings, and frequently visited locations in Pau dos Ferros/RN. Studies and research on the topic were conducted, along with site visits, to deepen the understanding of the corrosive process in structures. A highly advanced state of deterioration was evident, resulting from a corrosive process that took place over several years. Despassivation of the steel due to carbonation and chlorides caused parallel cracks along the main bars, parallel cracks along the stirrups, and spalling of the concrete cover, exposing the reinforcement. This research provided an in-depth understanding of corrosion types, with electrochemical corrosion being the most common in reinforced concrete structures. It highlighted factors that amplified the damage to structural elements, aiding in better decision-making. Consequently, it was observed that a lack of understanding about the corrosive process and insufficiently skilled labor contributed to not meeting the project's expected service life, as prescribed by standards. This led to recent constructions showing significant pathological manifestations. This study equipped us with sufficient knowledge to propose suitable solutions to prevent and correct such pathological occurrences.

Keywords: Corrosion, Concrete, Carbonation, Chlorides, Pathology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Célula de corrosão no concreto armado.	20
Figura 2 - Modelo de vida útil / Processo de grau máximo aceitável de corrosão.	22
Figura 3 - Cinética da corrosão em etapas de um metal, onde energias de ativação das etapas ($Q_2Q_3Q_1$) influem na velocidade de cada etapa ($V_2V_3V_1$).	23
Figura 4 - Resistência cinética (RC) (a), e resistência termodinâmica (RT) (b) à oxidação de Al e Fe pelo oxigênio.	23
Figura 5 - Carepas na superfície do tarugo de aço (esquerda) e carepas eliminadas pelo processo a direita.	26
Figura 6 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.	26
Figura 7 - Formas de corrosão.	27
Figura 8 - Formas de corrosão e fatores que as provocam.	30
Figura 9 - Representação esquemática das fissuras por Corrosão.	33
Figura 10 – Teste de carbonatação do concreto com solução de fenolftaléina, pH acima de 9, sem carbonatação.	34
Figura 11 – Corrosão de armadura em viga de concreto, sofrendo ataque de cloretos e carbonatação.	35
Figura 12 - Triângulo da Corrosão.	36
Figura 13 - Tipos de tratamento superficiais: pinturas e selantes (a), hidrofugantes (b), bloqueadores de poros (c).	39
Figura 14 - Tempo para iniciar a corrosão de armaduras em corpos de prova de argamassa expostos a soluções de cloretos para quatro distintos inibidores, com três diferentes quantidades cada um.	41
Figura 15 - Taxa de corrosão de armaduras em corpos de prova de concreto antes e depois do tratamento com MFF.	42
Figura 16 - Armaduras com pintura epóxi, com e sem corrosão.	43
Figura 17 - Estrutura da camada de galvanização.	44
Figura 18 - Efeito do PH na taxa de corrosão do zinco puro.	45
Figura 19 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.	46
Figura 20 - Mapa da localização geográfica de Pau dos Ferros – RN.	48
Figura 21 – Localização geográfica do prédio.	49
Figura 22 - Fachada frontal e lateral do prédio.	49
Figura 23 - Localização geográfica da igreja.	50

Figura 24 - Fachada frontal da igreja.	50
Figura 25 - Localização Geográfica da residência multifamiliar.....	51
Figura 26 - Fachada frontal e lateral da residência multifamiliar.	51
Figura 27 - Teste de umidade do substrato com a manifestação patológica.	53
Figura 28 – Teste de umidade no substrato com a manifestação patológica.	54
Figura 29 - Pilar do prédio com fissuras verticais alinhadas com as barras longitudinais.	55
Figura 30 - Pilar do prédio com fissuras verticais alinhadas com as barras longitudinais.	55
Figura 31 - Pilar em estágio avançado de deterioração.	56
Figura 32 - Substrato com presença de salitre, manchas de umidade e corrosão de armadura na residência unifamiliar.....	57
Figura 33 - Substrato com mancha de umidade, salitre, fungo e bolor na igreja.....	57
Figura 34 - Triângulo da corrosão aplicado ao ambiente.	58
Figura 35 - Fissuras de corrosão nas armaduras longitudinais dos pilares do prédio.	59
Figura 36 - Corrosão uniforme ao longo de toda superfície do aço.....	60
Figura 37 - Pilares com alto nível de degradação devido a corrosão de armaduras.	61
Figura 38 - Pilar em processo corrosivo bastante agressivo.	63
Figura 39 - Pilares com alto nível de degradação devido a corrosão das armaduras.	64
Figura 40 - Pilar com alto nível de degradação e sem estribos.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de conversão das taxas de corrosão (densidade do metal, g/cm ³)	25
Tabela 2 - Classe de agressividade ambiental (CAA) - ABNT NBR 6118/2014.....	31
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto – ABNT NBR 6118:2014.....	31
Tabela 4 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	32
Tabela 5 - Tipos de tratamento superficial e suas características.	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diagnóstico de manifestação patológica no Prédio Multifamiliar.....	60
Quadro 2 - Diagnóstico de manifestação patológica na residência unifamiliar.....	62
Quadro 3 - Diagnóstico de manifestação patológica na Igreja.	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Taxa de Corrosão por variação de massa	24
Equação 2: Taxa de Corrosão por profundidade.....	24
Equação 3: Formação do hidróxido de ferro II.....	37
Equação 4: Formação do hidróxido de ferro III.....	37
Equação 5: Formação do óxido de Ferro Hidratado.....	38

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
EPD	Declaração Ambiental de Produto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	Organização Internacional para Padronização
NBR	Norma Técnica Brasileira
RN	Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi - Árido
VUP	Vida Útil de Projeto

LISTA DE SÍMBOLOS

Δc	Variação do cobrimento nominal
ΔG	Variação de Energia Livre
ΔM	Variação da Massa do Metal
a/c	Relação água/cimento
AgNO ₃	Nitrato de Prata
Al	Alumínio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
Fe	Ferro
Fe(OH) ₂	Hidróxido de Ferro II
Fe(OH) ₃	Hidróxido de Ferro III
Fe ²⁺	Ferro ionizado
Fe ₂ O ₃	Oxido de Ferro
g/m ² dia	Gramas por metro quadrado por dia
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
lpy	Polegada por ano
mdd	miligrama por decímetro quadrado dia
M _e	Metal
M _e ⁿ⁺	Metal no seu estado iônico
MFF	Mono Flúor Fosfato
mg/cm ² ano	Miligrama por centímetro quadrado por ano
mm/ano	Milímetro por ano
MPa	Mega Pascal
O ₂	Oxigênio
OH-	Hidroxila

pH	Potencial de Hidrogênio
Q	Energia de Ativação
RC	Resistência cinética a corrosão
RT	Resistência Cinética Termodinâmica
S	Área
T _H	Taxa de Corrosão por profundidade
T _m	Taxa de Corrosão por variação de massa
Zn	Zinco
μm/ano	Micrômetro por ano
τ	Tempo
V ₁	Velocidade de corrosão na etapa 1
V ₂	Velocidade de corrosão na etapa 2
V ₃	Velocidade de corrosão na etapa 3
Q ₁	Energia de ativação na etapa 1
Q ₂	Energia de ativação na etapa 2
Q ₃	Energia de ativação na etapa 3

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	20
3.1	CORROSÃO	21
3.1.1	Tipos de corrosão em estruturas de concreto armado	25
3.1.2	Formas de corrosão	27
3.2	CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	28
3.2.1	Despassivação por carbonatação	33
3.2.2	Despassivação por cloretos	34
3.3	TRIÂNGULO DA CORROSÃO	35
3.4	FORMAS/TÉCNICAS DE PROTEÇÃO NA CORROSÃO DE CONCRETO ARMADO.....	36
3.4.1	Métodos de aplicação no concreto	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	ESTRUTURA FÍSICA DO OBJETO DE ESTUDO	53
5.2	TRIÂNGULO DA CORROSÃO NOS LOCAIS DE ESTUDO	58
5.3	CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DO PRÉDIO	58
5.3.1	Formas de corrosão no prédio	60
5.4	CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR.	61
5.4.1	Formas de corrosão na residência	62
5.5	CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DA IGREJA.	63
5.5.1	Formas de corrosão igreja.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	RESUMO.....	69

1 INTRODUÇÃO

Para falar em corrosão deve-se compreender, a priori, que o termo é utilizado, para determinar o processo de destruição total, parcial superficial ou estrutural dos materiais metálicos. Para GENTIL (2022), a corrosão é um processo espontâneo de deterioração de metais que ocorre por ação química ou eletroquímica em reação ao meio que encontra - se inserido. Desta forma a mesma torna-se um dos maiores vilões das construções, já que em sua maioria utilizam-se de concreto armado ou somente estruturas metálicas por completo, tornando o processo corrosivo algo natural no meio civil.

As manifestações patológicas que acontecem e potencializam a corrosão, vem gerando grandes preocupações e sendo responsável por inúmeros prejuízos ocasionados ao longo dos anos, sendo necessário um aprofundamento no estudo das causas e soluções, para a formação do maior número de profissionais com expertise no assunto, buscando assim diminuir erros e falhas que acarretam numa falta de desempenho, qualidade e segurança nas edificações.

As manifestações patológicas que ocasionam e potencializam as corrosões podem ser provenientes de diversas fontes e ocasionar trincas, fissuras, infiltrações, deslocamento de revestimentos, tudo isso em sua maioria por conta de umidade ou seja a água de forma direta e indireta acaba se tornando uma grande vilã. De acordo com Oliveira (2020 apud DE SOUZA, 2008), os defeitos mais comuns na construção civil, são decorrentes da penetração de água ou devido a formação de manchas de umidade. Estas que podem se manifestar em diversos elementos das edificações, como, paredes, pisos, fachadas e peças estruturais em concreto armado.

Segundo BERTOLINI (2016), as manifestações são fenômenos que causam degradação superficial conhecidos como eflorescência ou criptoflorescência devido ao ataque de sulfatos que estão diretamente relacionados a presença de umidade ocorrendo assim uma reação química que por sua vez ocasiona formação de novos compostos.

Porém tem-se como fatores a deficiência de projetos e a própria execução, a má qualidade dos materiais empregados ou o emprego inadequado deles, a falta de manutenção preventiva e a corretiva. Portanto, vale salientar que atualmente, com o acesso a diversas informações, através principalmente das mídias sociais, fizeram dos consumidores pessoas mais exigentes em relação a qualidade do produto final e, conseqüentemente, a prestação de serviços.

Portanto a medida que está cobrança aumenta, nota-se uma deficiência por parte da mão de obra adequada e qualificada, sendo observada uma grande quantidade de obras novas, muitas vezes, com poucos anos de construção, (as vezes 5 anos ou até em execução), já apresentando falhas estruturais e visuais, que em sua maioria são provenientes da corrosão. Segundo PINHO (2011), a vida útil das estruturas envolve uma análise abrangente de todas as etapas do processo construtivo, e os engenheiros hoje, que já pensam normalmente no ciclo de vida das estruturas, estão cada vez mais conscientes da necessidade de manutenção e, por isso, programam-se para fazer o monitoramento e a manutenção preventiva e corretiva das estruturas.

Tudo isso, com base na norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013, criada com o objetivo de atendimento às necessidades daqueles que viverão nas edificações construídas, essa norma é estabelece critérios de durabilidade para uma edificação e seus sistemas, visando prolongar a VUP (vida útil de projeto), com base a atender a necessidade do usuário, prevenindo o surgimento de patologias como a corrosão.

A prevenção se dá a partir da manutenção, que em suma significa um conjunto de atividades a serem executadas a fim de que se assegure a conservação ou mesmo a recuperação da capacidade funcional da edificação e dos sistemas que a compõem, de modo que sejam atendidas as necessidades de segurança do usuário. Acerca ainda da manutenção, faz-se necessário abordar seus os principais tipos, quais sejam: manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

A manutenção corretiva, trata-se da modalidade mais dispendiosa, uma vez que é caracterizada pela tomada de ação no sentido do reparo ou recuperação apenas depois da ocorrência da falha, ou seja, o famoso “esperar quebrar para consertar”. A manutenção preventiva, de acordo com Gomide *et al.* (2006), “é aquela que atua antecipadamente, para que não haja a reparação”. Tendo como objetivo um bom planejamento onde faz-se necessário o conhecimento dos processos para uma programação adequada, estabelecimento de datas, critérios técnicos e administrativos a serem atendidos, balizados por dados estatísticos ou então o histórico de manutenção anteriores. Já a manutenção preditiva, é aquela atividade pautada pelo estudo dos equipamentos e sistemas, através da análise de seus comportamentos em uso, objetivando-se predizer e identificar eventuais anomalias, ou seja, um monitoramento contínuo para manter o sistema em funcionamento.

Estudos têm demonstrado que quanto mais cedo se detecta uma anomalia, mais eficiente e menos onerosa será intervenção. Assim, a manutenção preventiva e preditiva são as mais adequadas e econômicas em relação a corretiva. Em relação a custo, TUTIKIAN E PACHECO (2013) reforçam o que postula a lei dos cinco (SITTER, 1984), que atribui um custo para correção crescente, em progressão geométrica em uma razão de cinco, para as etapas de planejamento, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva.

Assim sendo, o gasto com a manutenção corretiva é 125 vezes maior que o gasto na etapa de planejamento.

Entende-se que uma das principais vantagens da aplicação desta norma, reside na possibilidade de os imóveis apresentarem um tempo útil de uso muito maior ao longo do tempo, ou seja, as edificações poderão durar muito mais tempo em decorrência dos cuidados adotados durante a sua execução e ao longo da sua utilização.

Nesse contexto essa pesquisa se propôs a estudar a sintomatologia dos sinais corrosivos que indicam estados doentes das peças estruturais em uma residência unifamiliar, uma igreja e um prédio multifamiliar na cidade de Pau dos Ferros – RN, visando propor soluções/técnicas protetivas como forma de cessar ou minimizar os processos corrosivos.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a sintomatologia dos sinais corrosivos que indicam estados doentios das peças estruturais em algumas residências e prédios comerciais na cidade de Pau dos Ferros – RN, bem como a identificação dos efeitos produzidos pelos agentes agressivos e propor soluções/técnicas protetivas como forma de cessar ou minimizar os processos corrosivos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os tipos de corrosões existentes nas peças em que serão estudadas.
- Realizar um prognóstico adequado com o intuito de entender a origem do problema.
- Apresentar o triângulo de corrosão, evidenciando a causa real e o tipo de patologia presente no local (metal, meio e condições operacionais).
- Apresentar soluções preventivas que poderiam terem sido utilizadas bem como métodos de reparo e execução adequada, tanto para evitar quanto reparar o processo corrosivo de forma correta.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

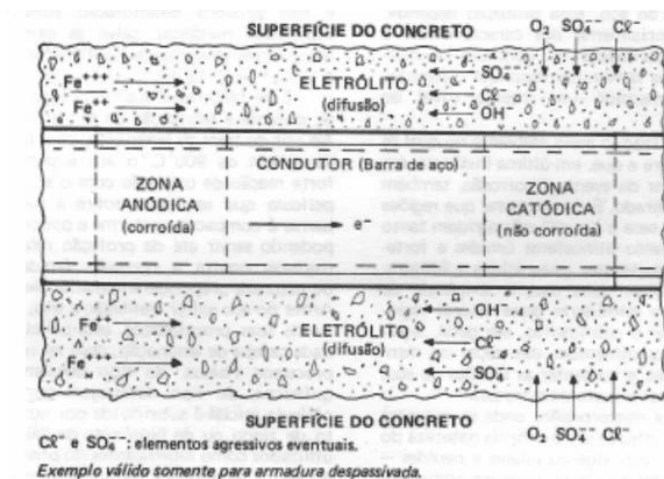
Para OLIVEIRA (2020), o conhecimento da origem de uma manifestação patológica é imprescindível para que o problema seja resolvido de forma definitiva. Suas origens são divididas em 4 fases, que podem se chamar de: (1) congênitas, quando tem origem na fase de projetos, por exemplo a incompatibilização de projetos, especificações inadequadas de materiais, erros de dimensionamento; (2) construtivas, quando tem origem na fase de execução, como por exemplo: não capacitação de mão de obra, falha no controle de qualidade de execução, irresponsabilidade técnica; (3) adquiridas, quando tem origem na fase de utilização da estrutura, como: manutenção inadequada ou ausente, utilização errônea da estrutura; (4) acidentais, quando tem origem em fenômenos atípicos, como: acidentes com colisão de veículos em estruturas, intempéries.

Ao longo de sua vida útil, a estrutura sofre interações com o meio ambiente em que está exposta e, devido a essa interação, sofre alterações que, no decorrer da sua utilização, podem comprometer sua estabilidade e funcionalidade. Essa interação pode ser do tipo físico, como exposições a altas temperaturas, químico, como por exemplo, ataques de íons cloretos e dióxido de carbono, biológico, bem como bolor, fungos e mecânica através de efeitos abrasivos e cargas aplicadas. Dessa forma, temos degradações que ocorrem diretamente no concreto, em sua pasta de cimento ou nos agregados, mas em sua maioria a corrosão das armaduras é um dos principais fatores de degradação do sistema (OLIVEIRA, 2020, p. 78).

O principal mecanismo da corrosão em estruturas de concreto armado se dá por meio eletroquímico, podendo ser corrosão localizada, conhecidas por pites ou cavidades, que ocorre geralmente em ambientes em contato com íons agressivos (cloretos) e sua formação se torna favorável na presença de oxigênio e umidade, ou corrosão generalizada que se forma a partir da redução do pH (potencial de hidrogênio) do concreto para valores menores que 9. O concreto fornece à armação uma proteção alcalina, desde que seja homogêneo e compacto, pois possui um pH aproximado entre 12,5 e 13,5 (OLIVEIRA, 2020, p. 86).

Portanto, devido ao processo eletroquímico de corrosão, temos uma diferença de potencial entre as regiões da armadura, que são conhecidas entre zonas anódicas e catódicas, temos então a formação de uma pilha onde a área que apresenta menor concentração de O₂ (oxigênio) é denominada de zona anódica e a zona catódica onde a corrosão ocorre. A Figura 1 apresenta como ocorre a corrosão no concreto armado.

Figura 1 - Célula de corrosão no concreto armado.



Fonte: Oliveira, (2020) apud Helene, (1986).

3.1 CORROSÃO

De acordo com GENTIL (2022), o mecanismo de corrosão nos metais pode ocorrer basicamente de duas formas. A primeira está relacionada com a corrosão de caráter puramente químico, conhecida por oxidação. Tal reação ocorre por uma reação gás/sólido na superfície do material, e é caracterizado pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal. A segunda, refere-se a corrosão eletroquímica, onde os elétrons são cedidos em uma determinada região e recebidos em outra, aparecendo uma pilha de corrosão decomposta em três etapas principais: processo anódico, deslocamento dos elétrons e íons e processo catódico.

Segundo GENTIL (2022), a segunda forma de corrosão é chamada de corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado. Esse fenômeno que é de natureza expansiva pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o posterior deslocamento do cobrimento do material. Todos esses fatores causam uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto, inabilitando a transferência de tensões entre os materiais, podendo assim levar a estrutura ao colapso (TUUTTI, 1982; ANDRADE, 1988; HELENE, 1993; MEHTA E MONTEIRO, 1994; GONZÁLEZ et al., 1996; CASTRO et al., 1998; AİTCIN, 2000).

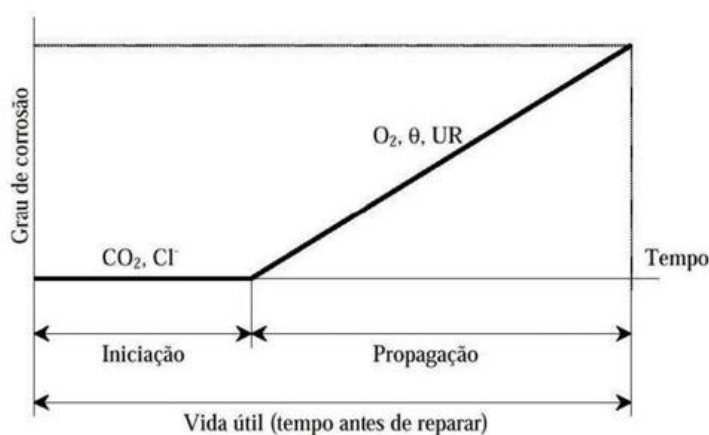
A deterioração de materiais não-metálicos, como por exemplo o concreto, borracha, polímeros e madeira, devido à ação do meio ambiente, é considerada também, por alguns autores, como corrosão. Assim, a deterioração do cimento Portland, empregado em concreto, por ação de sulfato, é considerada um caso de corrosão de concreto, perda da elasticidade da borracha, devido a oxidação por ozônio, pode ser considerada

como corrosão, a madeira exposta a solução de ácidos perde sua resistência devido a hidrólise da celulose, e admite-se este fato como corrosão da madeira. Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. (GENTIL, 2022, p. 1).

Para OLIVEIRA (2020), a corrosão de armaduras é dos processos degradantes com maior incidência nas estruturas de concreto armado. Para que possa acontecer, a corrosão precisa de um conjunto de fatores que tornam o ambiente favorável são eles: presença de água, de ar, área anódica, área catódica, um condutor metálico (armadura) e um eletrólito (solução aquosa existente no concreto).

De acordo com MEIRA, (2017 apud TUTTI, 1982), na Figura 2, observam-se dois períodos de corrosão. O primeiro período é o de iniciação, que é compreendido desde a entrada do agente agressivo até o processo de desp passivação da armadura. O segundo período corresponde à propagação, onde o processo de corrosão uma vez consolidado aumenta gradualmente, em escala exponencial, ocasionando danos severos às armaduras.

Figura 2 - Modelo de vida útil / Processo de grau máximo aceitável de corrosão.



Fonte: Meira, (2017) apud Tuutti, 1982.

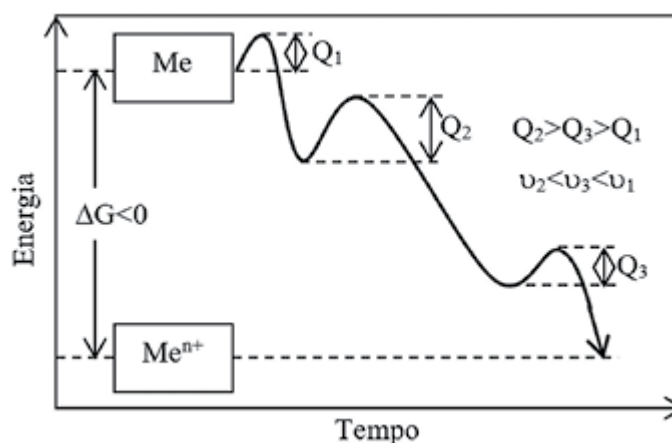
Para Tuutti (1982), esta subdivisão é adequada, pois os parâmetros primários diferem nos dois subprocessos.

A duração do período de iniciação é determinada pela rapidez com que a cobertura do concreto é alterada como resultado do fato de que substâncias neutralizantes ou ativadoras penetrem no aço, e pelas concentrações dessas substâncias que são necessárias para o início do processo de corrosão. Um caso limite que é geralmente utilizado neste contexto é considerar a sequência de penetração como um processo de difusão. Na prática, o transporte nem sempre é tão claro, mas é uma combinação de convecção e difusão. Um exemplo disso é o fato de que o concreto parcialmente seco

absorve uma solução de cloreto por meio de ação capilar. (TUUTTI, 1982, p. 18).

Como a corrosão, na maioria dos casos, ocorre em etapas, isto é, através de vários processos parciais (Figura. 3), o processo mais lento de todos os envolvidos na corrosão, aquele que necessita de maior energia de ativação, vai controlar a velocidade total de interação do metal com o meio corrosivo.

Figura 3 - Cinética da corrosão em etapas de um metal, onde energias de ativação das etapas (Q_2, Q_3, Q_1) influem na velocidade de cada etapa (V_2, V_3, V_1).

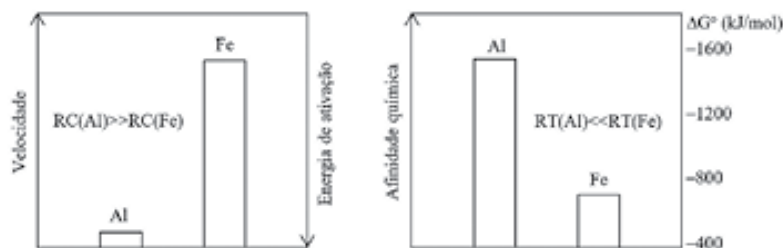


Fonte: Nikolaevich, (2021).

Pode-se observar na figura acima todos os caminhos cinéticos de transposição espontânea do metal do seu estado metaestável (Me) para um estado iônico estável (Me^{n+}) são equiprováveis, ocorrendo com a mesma variação de energia livre (ΔG). Entretanto esses caminhos não são idênticos e distinguem-se por energia de ativação (Q), em função do tempo, dessa forma, tem-se que quanto maior for a energia de ativação mais lento será a velocidade de corrosão.

Assim, pontua Nikolaevich (2021), que a energia de ativação pode ser adotada como critério de resistência cinética à corrosão de metais. Convém mencionar que a resistência cinética a corrosão (RC) de um metal pode ser inversa à sua resistência termodinâmica (RT), dependendo da natureza dos produtos produzidos pelo metal durante a corrosão (Figura. 4).

Figura 4 - Resistência cinética (RC) (a), e resistência termodinâmica (RT) (b) à oxidação de Al e Fe pelo oxigênio.



Fonte: Nikolaevich, (2021).

Dessa forma compreende-se que a taxa de corrosão caracteriza, de modo integral, a rapidez com que os metais interagem com o meio ambiente. Na prática afirma Nikolaevich (2021), que comumente se usa a taxa de corrosão por variação de massa e a taxa de corrosão por profundidade. Onde, para calcular a taxa de corrosão temos a Equação 1, que fica evidenciada por sua variação de massa, tem-se que (T_m) é perda, ou ganho, de massa do metal (Δ_m) por sua área (S) e por tempo (τ):

Equação 1: *Taxa de Corrosão por variação de massa*

$$T_m = \frac{\Delta_m}{S\tau}$$

As unidades para expressar essa taxa de corrosão podem ser: g/m²dia, mg/cm²ano e mdd (miligramas por decímetro quadrado por dia). Para calcular a taxa de corrosão por profundidade, temos a Equação 2 representada por: (T_H) que é a profundidade de corrosão no interior do metal (H) por tempo (τ):

Equação 2: *Taxa de Corrosão por profundidade*

$$T_H = \frac{H}{\tau}$$

Segundo Nikolaevich (2021), as unidades para expressar essa taxa de corrosão podem ser mm/ano, μ m/ano e ipy (polegada por ano). As taxas de corrosão por variação de massa e profundidade expressas em diferentes unidades podem ser convertidas, de acordo com a (Tabela.1).

Tabela 1 - Fatores de conversão das taxas de corrosão (densidade do metal, g/cm³)

Multiplicar	Por	Para obter
T_H	25,4	T_H (mm/ano)
T_m (mdd)	0,00144/d	T_H (ipy)
T_m (mdd)	0,0365/d	T_H (mm/ano)
T_m (mdd)	36,5/d	T_H (μ m/ano)
T_m (g/m ² dia)	0,365/d	T_H (mm/ano)
T_m (mg/cm ² ano)	10/d	T_H (μ m/ano)

Fonte: Nikolaevich, (2021).

A constatação da corrosão em fase inicial é vantajosa, pois pode evitar contratempos e recursos financeiros para a correção da mesma, assim como também até o desmoronamento das edificações. Porém, essa verificação é complicada no início da corrosão, pois não é visível até que cheguem à superfície. Portanto, a sua avaliação por inspeção visual só é possível tardiamente. (AGGELIS *et al.*, 2010).

De acordo com GENTIL (2022), no processo corrosivo, a transferência de elétrons acontece de forma simultânea e equilibrada. Esse processo é denominado oxirredução, os metais geralmente possuem elétrons livres e apresentam uma tendência de doar ou recebê-los, quando doados os elétrons é gerada a reação de oxidação, em contraponto a substância que reage com metal ganha esses elétrons, é então gerada a reação de redução.

3.1.1 TIPOS DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Para ROCHA (2017), o processo de corrosão, segundo sua natureza, pode assumir duas formas, sendo estas: corrosão química ou corrosão eletroquímica.

▪ Corrosão Química

Na corrosão química, o metal interage diretamente com os gases do meio, formando os produtos de corrosão (GENTIL, 2022). No entanto, esse tipo de corrosão é pouco importante para as obras civis, uma vez que, normalmente, esse processo é lento e os óxidos formados criam uma película sobre o metal, que reduz, ainda mais, a velocidade das reações. Esse tipo de corrosão assume maior significado a altas temperaturas. A formação da carepa de laminação no processo siderúrgico é um

exemplo de corrosão química, em que o aço, a altas temperaturas, reage com o oxigênio do meio ambiente, formando uma película de óxidos, compacta, uniforme e pouco permeável (HELENE, 1993). A Figura 5, ilustra exatamente este processo.

Figura 5 - Carepas na superfície do tarugo de aço (esquerda) e carepas eliminadas pelo processo a direita.



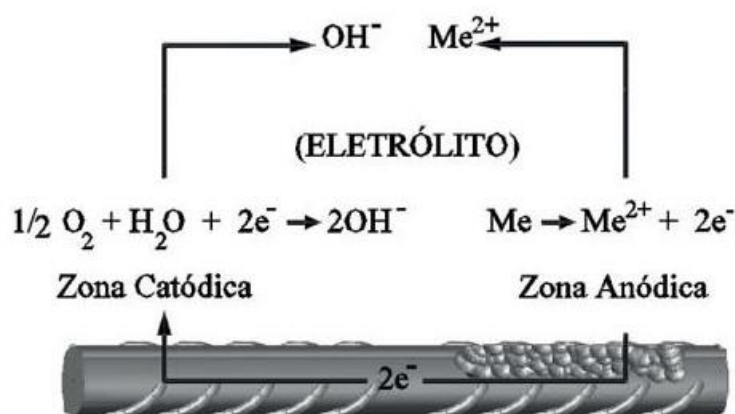
Fonte: Cunha, (2006).

▪ Corrosão Eletroquímica

A corrosão eletroquímica é a mais importante para as obras civis, uma vez que é a que ocorre nas estruturas de concreto armado e pode atingir graus de deterioração bastante significativos. Nesse tipo de corrosão, há sempre uma reação de oxidação e outra de redução e a circulação de íons através de um eletrólito (ANDRADE, 1988). Na reação de oxidação, o metal libera elétrons, que migram através deste, reagindo em outro lugar para produzir a redução de outra substância, que no caso do concreto armado é o oxigênio.

Assim, a corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica, existindo: a presença de um anodo que se caracteriza pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); um cátodo, onde são consumidos os elétrons gerados na região anódica (redução); uma diferença de potencial entre ambos, sendo o ânodo de potencial mais eletronegativo; uma ligação metálica entre o anodo e o cátodo, que pode ser caracterizada pelo mesmo material metálico e uma ligação externa caracterizada pela condução iônica através do eletrólito. A Figura 6 representa o fenômeno e expõe as reações parciais que se processam nas regiões anódica e catódica, características de um meio alcalino como o concreto.

Figura 6 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.

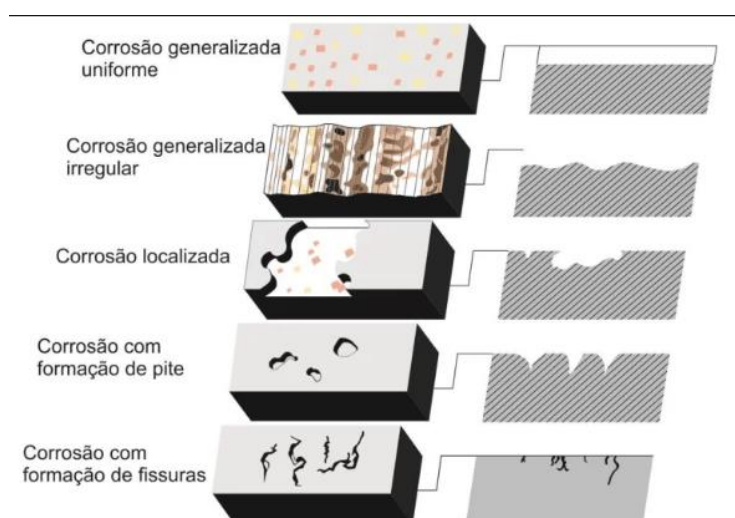


Fonte: Rocha, (2017).

3.1.2 FORMAS DE CORROSÃO

A corrosão pode se apresentar de forma generalizada ou localizada. Na corrosão generalizada, o desgaste do material ocorre de forma mais ou menos uniforme e atinge extensas áreas do metal. Na corrosão localizada, o desgaste se processa em uma superfície limitada e, em geral, tende a se aprofundar de modo mais rápido do que em um processo de corrosão generalizada. Essas expressões da corrosão podem sofrer algumas variações morfológicas quando analisadas em maior profundidade, podendo assumir, entre outras formas, aparência superficial uniforme ou irregular, com a formação de pites ou com a formação de fissuras, conforme expõe a Figura 7 (FELIU, 1984).

Figura 7 - Formas de corrosão.



Fonte: Feliú, (1984).

Corrosão Uniforme ou Generalizada: O ataque se estende sobre toda superfície do metal, na qual existem inúmeros ânodos e cátodos, formando micropilhas que mudam a todo tempo. Nesse caso a perda de seção pode ser uniforme ou irregular.

Corrosão Localizada: ocorre um ataque intermediário entre a corrosão uniforme e a corrosão por pites. O ataque se produz em zonas mais ou menos extensas do material, as quais, por diferentes razões, são anódicas em relação às demais. Um dos motivos para que isso ocorra pode ser a mudança ou heterogeneidade na composição química do material ou do eletrólito que o circunda.

Corrosão por Pites: o ataque se produz em zonas discretas do material, as quais são mais ativas do que o resto da superfície. Esse tipo de corrosão é comum no caso da ação de contaminantes que têm a propriedade de romper a capa passiva em pontos específicos, como é o caso dos cloretos.

Corrosão com formação de fissuras: além das condições propícias para a corrosão, o metal se encontra submetido a tensões importantes de tração. Nesse caso, surgem fissuras no material que se propagam na direção transversal à carga, produzindo rupturas com níveis baixos de tensão.

3.2 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Há muito tempo o concreto tem sido utilizado como elemento de construção: uma substância simples composta de água, areia, brita e cimento que se tornou o bloco construtor da civilização, um material amplamente utilizado na construção civil. Com o advento do mundo moderno, o desenvolvimento deste material vem permitindo novos avanços na área, com edificações cada vez mais arrojadas e duráveis.

A descoberta do concreto armado aconteceu de uma maneira bastante peculiar. Em 1949, um agricultor francês, que morava em uma fazenda no interior de seu país, resolveu um dia criar um barco, utilizando cimento e ferro para testar em um de seus tanques, registrando sua patente em 1955. Sua criação não teve grande sucesso, porém chamou atenção de outro francês, Joseph Monier.

Monier trabalhava na construção de vasos artesanais, usando madeira e cerâmica, porém esses materiais não eram resistentes, apodrecendo ou quebrando com frequência. Então, ao saber da descoberta do agricultor, ele passou a utilizar o concreto armado em seus vasos, e em outras estruturas artesanais, e viu que estava obtendo o resultado desejado. Patenteou, então, várias destas estruturas. Entre suas

criações, Monier construiu a primeira ponte de concreto armado em 1875, no castelo Chazelet, que existe até hoje. Em 1886, o engenheiro alemão Gustav Adolf Wayss (1851-1917) comprou as patentes de Monier para desenvolvê-las, e durante 20 anos sua empresa de construção trabalhou para tentar eliminar as dúvidas que ainda existiam sobre o concreto armado.

O concreto é um dos materiais mais consumido do mundo, em decorrência da grande procura pelo uso do concreto armado, ocasionado pela sua versatilidade e por sua eficácia em obras de pequeno, médio e grande porte. Consequentemente, o seu uso sem as devidas precauções pode desencadear diversas manifestações patológicas, tais como: fissuras, trincas, flambagem, corrosão, desagregação, eflorescência, manchas, muitas vezes causadas por mal execução, por materiais de má qualidade, por não respeitar as etapas da execução ou até mesmo pelo uso inadequado da estrutura (CIRINO *et al.*, 2020). O concreto ainda é o melhor, mais durável e sustentável material estrutural da atualidade, segundo a Declaração Ambiental de Produto (EPD), (introduzida na ISO 14025:2010).

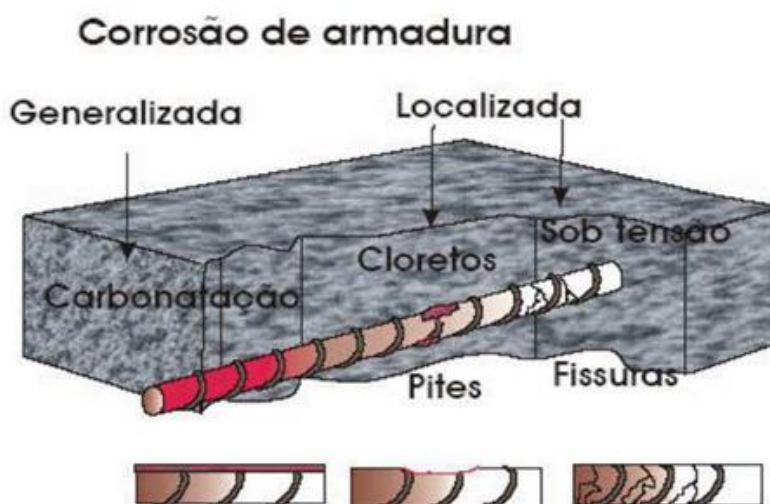
Para OLIVEIRA (2020), as estruturas de concreto armado apresentam, ao longo de suas vidas úteis, sinais de que algo não está a ocorrer como deveria e que essas estruturas precisam de intervenção. A sintomatologia é o estudo e interpretação do conjunto de sinais/sintomas observados que indicam os estados doentios. Na construção civil, trata-se do processo de identificação dos efeitos produzidos pelos agentes agressivos. As manifestações patológicas, salvo exceções, apresentam características em forma de sintomas com base nos quais é possível definir a sua origem, a causa, o mecanismo de ação e também estimar quais as consequências que a não regularização do problema pode acarretar.

Quando se analisa uma estrutura que apresenta algum sintoma, é necessário entender a origem e o mecanismo dessa doença, buscando suas causas antes de dar o diagnóstico correto. O conhecimento da origem de uma manifestação patológica é imprescindível para que o problema seja resolvido de forma definitiva. Suas origens são divididas em 4 fases que podem se chamar de: (1) congênitas, quando tem origem na fase de projetos, por exemplo: falta de compatibilização de projetos, especificação inadequada de materiais, erros de dimensionamento; (2) construtivas quando tem origem na fase de execução, como por exemplo: não captação de mão de obra, falha no controle de qualidade de execução, irresponsabilidade técnica; (3) adquiridas, quando tem origem na fase de utilização da estrutura, como: manutenção inadequada ou ausente, utilização errônea da estrutura; (4) acidentais, quando tem origem em fenômenos atípicos, como: acidentes com colisão de veículos em estruturas, intempéries. (OLIVEIRA, 2020, p78).

Toda edificação, ao longo de sua vida útil sofre interação em sua estrutura com o meio ambiente ao qual está exposta e devido a essa interação sofre alterações que, no decorrer da sua utilização, podem comprometer a sua estabilidade: funcionalidade. OLIVEIRA (2020) afirma que a interação do meio ambiente pode ser do tipo físico (ex.: efeito de exposição a altas temperaturas), químico (ex.: ataque de íons cloreto e dióxido de carbono), biológico (ex.: bolor e vegetações) ou mecânico (ex.: efeito de abrasão ou de cargas aplicadas). No primeiro caso (físico), a degradação ocorre diretamente no concreto, em sua pasta de cimento ou nos agregados. Nos outros casos, a armadura é o um dos principais fatores de degradação do sistema. Alguns dos sintomas de maior incidência nas estruturas de concreto armado são as fissuras, bolor, as eflorescências as manchas no concreto aparente, a corrosão de armaduras e os ninhos de concretagem (segregação dos materiais constituintes do concreto).

Para CASCUDO (1997), os principais agentes agressivos que desencadeiam a corrosão das armaduras são, a ação dos íons cloretos que provocam corrosão localizada por pite, redução de pH do aço (corrosão generalizada → carbonatação) e corrosão localizada sob tensão, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Formas de corrosão e fatores que as provocam.



Fonte: Cascudo, (1997).

Os metais possuem uma proteção (passivação) feita por uma fina camada protetora na superfície do mesmo, devido a presença da base Ca(OH)_2 de $\text{pH} = 13$. Se o pH da camada passivadora cair para um valor abaixo de 11, há formação de compostos ferrosos expansivos, resultando em um aumento no volume do aço

original, o que causa fissuração e lascamento no concreto, desencadeando o problema. A passivação da estrutura deve estar garantida pela vida útil do concreto. O cobrimento de cada estrutura deve ser pensado, obedecendo a Tabela 2 – Classes de Agressividade Ambiental (CAA) Da NBR 6118:2014, que irá variar de acordo com sua exposição ao ambiente.

Tabela 2 - Classe de agressividade ambiental (CAA) - ABNT NBR 6118/2014.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT (2014).

Com base na CAA, o projetista encontra informação para definir a qualidade do concreto através da relação água/cimento (a/c), e da sua classe de resistência, bem como o cobrimento de uma peça estrutural determinados nas Tabelas 3 e 4 da NBR 6118:2014.

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto – ABNT NBR 6118:2014.

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento, em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.

2) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT (2014).

Tabela 4 - 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 ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15\text{ mm}$.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

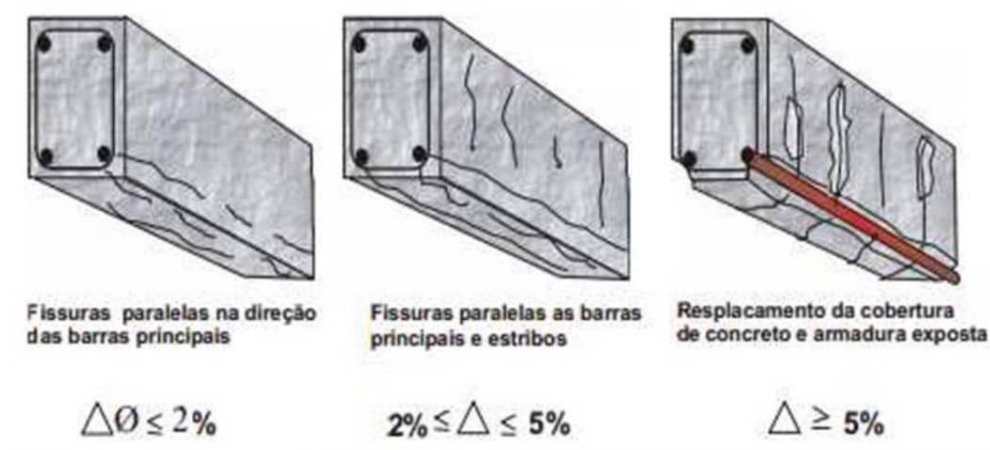
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45\text{ mm}$.

Fonte: ABNT (2014).

As fissuras são os sintomas mais comuns e os primeiros a aparecerem em uma estrutura de concreto em processo de corrosão. A depender de sua origem e intensidade, podem significar algo simples, como um problema estético, ou significar que algo grave está para acontecer. Por isso, é preciso muita cautela e profissionais habilitados na hora de interpretá-las, pois uma recuperação ou reforço inadequado, além de não solucionar o problema, pode agravá-lo. É de suma importância diagnosticar a origem e o que está causando a fissura, pois se as causas não forem solucionadas, de nada adiantará tratar apenas a abertura. A sua configuração, sua abertura, posição, espaçamento e trajetória podem indicar como foi causada.

Na figura 9, é apresentado um esquema de fissuras por corrosão ao longo das barras longitudinais, (HUSNIS, 2003) associa o grau de fissuração do concreto ao percentual de variação de volume apresentado pelo aço.

Figura 9 - Representação esquemática das fissuras por Corrosão.



Fonte: Husnis (2003).

Vale ressaltar que, os dois principais agentes agressivos responsáveis pelo desencadeamento de reações de corrosão são: a despassivação do aço por carbonatação e por cloretos.

3.2.1 DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO

Para OLIVEIRA (2020) a carbonatação é o resultado da ação em que o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente no cimento hidratado, formando após algumas outras reações o carbonato de cálcio (CaCO_3). Com isso há a redução do pH do concreto para valores inferiores a 9, retirando a proteção alcalina que ele exerce sobre a armadura. A corrosão localizada das armaduras tem início quando a frente de carbonatação consegue penetrar todo o cobrimento do concreto e atinge a armadura, despassivando-a.

Com o avanço da carbonatação do concreto, esse passa a apresentar uma zona mais externa carbonatada, onde o pH diminui, e uma zona mais interna, onde o pH se mantém em níveis mais elevados. Para a medida da profundidade de carbonatação, é usual o emprego de soluções indicadoras de pH, como as soluções de fenolftaleína e timolftaleína. A mais empregada é a solução de fenolftaleína a 1% em álcool etílico. Essa solução, que é incolor a princípio, é aspergida sobre a superfície de concreto recém-fraturada e assume a cor roxo-púrpura se o pH é superior a 9,5, uma cor que vai do rosa ao roxo-púrpura para pHs entre 8 e 9,5 e se mantém incolor se o pH é inferior a 8 (ANDRADE, 1988). No caso do emprego da solução indicadora de timolftaleína a 1%, essa assume a cor azul quando o pH é maior que 10,3 e se mantém incolor para pHs mais baixos que esse referencial. Esta é a

maneira mais comum de avaliar o fenômeno da carbonatação do concreto, conforme a Figura 10. Nota-se por meio da figura que as regiões não carbonatadas apresentam coloração rosa, enquanto que as partes carbonatadas não tem alteração de cor.

Figura 10 – Teste de carbonatação do concreto com solução de fenolftaléina, pH acima de 9, sem carbonatação.



Fonte: Dynamis Techne, (2016).

3.2.2 DESPASSIVAÇÃO POR CLORETOS

OLIVEIRA (2020), afirma que a presença de íons cloretos no concreto pode ocasionar corrosão por pites. Estes íons podem ser adicionados acidentalmente na preparação do concreto através de água de amassamento contaminada, utilização de agregados miúdos ricos em cloretos, como a areia de praia, e também a utilização de aceleradores de pega. De acordo com a NBR 12655 do (ABNT, 2015) o teor de cloretos com relação a massa de cimento deve ser de 0,05% para concreto protendido, 0,15% para concreto armado exposto a íons cloreto, 0,4% para concreto armado em condições não severas e 0,3% para concreto armado em outras condições.

Em ambientes de classe de agressividade III ou IV, onde há contato com áreas marinhas, é possível encontrar cloretos que penetram em forma de névoa salina,

contato direto com a água e respingos de maré no concreto através de sua porosidade ou incidência de fissuras.

Nas reações com cloretos as armaduras podem ser despassivadas mesmo diante de alto valor de pH para o concreto, porém seu efeito mais danoso se relaciona ao fato de que durante as reações há liberação final de íons cloretos, que novamente ficam livres para reagir com o Ferro presentes no aço. A Figura 11 apresenta um pilar em zona marítima completamente carbonatado e com um grau elevado de corrosão por íons cloreto.

Figura 11 – Corrosão de armadura em viga de concreto, sofrendo ataque de cloretos e carbonatação.



Fonte: Asope Engenharia (2018).

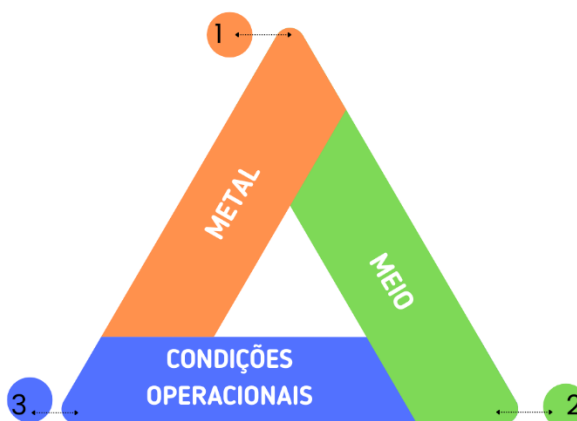
3.3 TRIÂNGULO DA CORROSÃO

O triângulo da corrosão é um conceito utilizado para ilustrar as três condições necessárias para que a corrosão eletroquímica de um metal ocorra. Para GENTIL (2022), no estudo dos processos corrosivos deve-se sempre considerar as variáveis dependentes do material metálico, do meio corrosivo e das condições operacionais, pois o estudo conjunto dessas variáveis permitirá indicar o material mais adequado para ser utilizado em determinados equipamentos ou instalações. Dentre essas variáveis devem ser consideradas:

- **Material metálico:** composição química, presença de impurezas, processo de obtenção, tratamentos térmicos e mecânicos, estado da superfície, forma, união de materiais (solda, rebites, etc.), contato com outros metais:
- **Meio corrosivo:** composição química, concentração, impurezas, pH, temperatura, teor de oxigênio, pressão, sólidos suspensos.
- **Condições operacionais:** solicitações mecânicas, movimento relativo entre material metálico e meio, condições de imersão no meio (total ou parcial), meios de proteção contra a corrosão, operação contínua ou intermitente.

A Figura 12 apresenta o triângulo da corrosão com os parâmetros determinantes.

Figura 12 - Triângulo da Corrosão



Fonte: Autoria Própria (2024)

Segundo Donadio *et al.*, (2023), o triângulo da corrosão explica de maneira simplificada as condições básicas para a ocorrência de corrosão eletroquímica, destacando três fatores cruciais: o material, o meio corrosivo e as condições ambientais. A interação desses elementos determina a taxa de corrosão e a eficácia das medidas de proteção.

Se qualquer um dos três componentes (metal, eletrólito ou diferença de potencial) for removido ou controlado, a corrosão eletroquímica não ocorrerá. Este conceito é fundamental na prevenção da corrosão, pois permite que técnicas de mitigação se concentrem em alterar ou eliminar um dos três elementos.

3.4 FORMAS/TÉCNICAS DE PROTEÇÃO NA CORROSÃO DE CONCRETO ARMADO.

De acordo com BARROS *et al.*, (2016), o concreto oferece uma dupla proteção ao metal graças ao seu pH, no entanto, por se tratar de um material poroso,

também é de fácil penetração de oxigênio. A manutenção constante torna-se vital para sua conservação, conforme o relatado nenhuma ação de recuperação ou de manutenção foi realizado no açougue desde a sua construção.

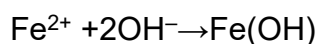
Segundo DO NASCIMENTO *et al.*, (2015), soluções simples poderiam diminuir a frequência, como o aumento da resistência do concreto, redução da relação água/cimento, projeto de rufos, pingadeiras e detalhes que impeçam a infiltração de água, aumento da espessura de cobrimento (e devida fiscalização em obra para garantir correta execução), e impermeabilização de superfícies com contato direto com o meio ambiente.

O processo de formação da ferrugem é um exemplo de corrosão eletroquímica. O ferro, principal componente das armaduras no concreto armado, se oxida facilmente quando exposto ao ar úmido (oxigênio(O_2) e água (H_2O)). Essa oxidação resulta no cátion Fe^{2+} , com perda de dois elétrons (Ânodo: $Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$), formando um dos polos da pilha. O processo, então, continua com reduções passíveis de acontecer, sendo a mais comum a da água (Cátodo: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$).

Enquanto os cátions Fe^{2+} migram para polo negativo (cátodo), o ânions OH^- migram para o polo positivo (ânodo) e ocorre a formação do hidróxido ferroso ($Fe(OH)_2$). Na presença de oxigênio, esse composto é oxidado a Hidróxido de ferro III ($Fe(OH)_3$), que depois perde água e se transforma no Óxido de ferro (III) monohidratado ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$), um composto que possui coloração castanho-avermelhada (ferrugem) (RIBEIRO, 2014). As reações a seguir mostram o processo de oxidação do aço/ferro e seu processo de formação de ferrugem.

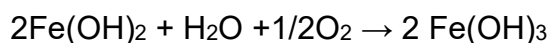
Reação 1: Esta é uma reação de precipitação onde o íon ferro, reage com o íon hidróxido, ambos na sua forma aquosa, para formar hidróxido de ferro em sua forma sólida. Representado na Equação 3.

Equação 3: Formação do hidróxido de ferro II



Reação 2: Nesta reação, temos dois moles de hidróxido de ferro II em seu estado sólido reagindo com a água em seu estado líquido e o oxigênio em seu estado gasoso, formando um novo hidróxido de ferro em seu estado sólido. Representado na Equação 4.

Equação 4: Formação do hidróxido de ferro III



Reação 3: Nesta reação, temos dois moles do hidróxido de ferro III em seu estado sólido, sofrendo uma decomposição que resulta na formação o óxido de ferro hidratado em seu estado sólido. Pois a água é liberada na forma de vapor. Como representado na equação 5.

Equação 5: Formação do óxido de ferro hidratado



OLIVEIRA (2020), explica que as manifestações da corrosão de armaduras se apresentam em uma sequência iniciada pelo aparecimento de manchas superficiais amarronzadas, seguidas de expansões ocasionadas pela formação de óxi-hidróxidos, que ocupam espaços na maioria das vezes maiores que a seção original da barra da armadura, causando elevadas tensões de tração, podendo ser superiores a 15MPa.

A resistência à tração do concreto equivale em média a 10% de sua resistência à compressão. Se temos um concreto de 50MPa, o mesmo terá resistência à tração média de cerca de 5MPa (considerando um concreto de maior resistência do que os padrões médios atuais mais utilizados). Como o concreto não resiste a tensões que podem chegar a 15MPa de tração, a expansão das armaduras causa fissurações paralelas às barras longitudinais, deslocamento da camada superficial do concreto, redução da seção da barra, perda de aderência entre a armadura e o concreto e, em casos mais elevados, o colapso.

Portanto, para encontrar a melhor forma, a melhor técnica de proteção, deve-se entender o que acontece em todo o processo corrosivo do metal, com base no meio em que este encontra-se inserido e as condições operacionais como vimos acima no triângulo da corrosão, a parti disso surgem as ideias sobre qual procedimento seguir, qual é o mais econômico, qual me dará maior VUP (vida útil de projeto). Não há dúvidas que o método mais econômico e eficaz de proteção da armadura é projetar e executar uma dosagem de concreto associada a um cobrimento da armadura adequados à agressividade ambiental à qual a estrutura estará exposta. Em casos específicos, é possível usar métodos complementares de proteção, sobre os quais se comenta a seguir, considerando os métodos de aplicação sobre o concreto e os métodos de aplicação sobre a armadura.

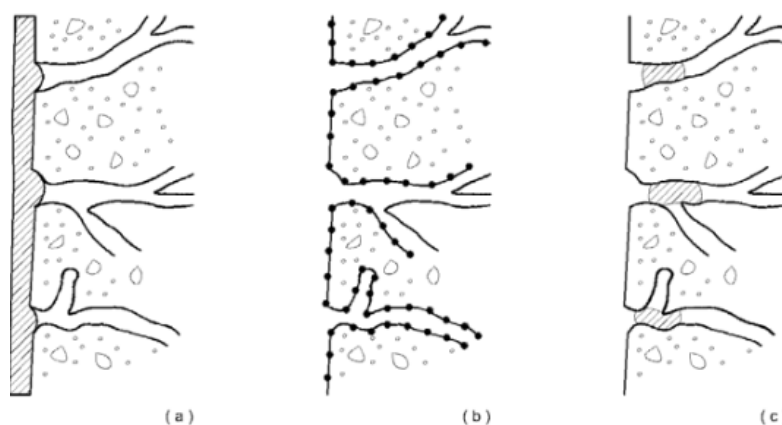
3.4.1 MÉTODOS DE APLICAÇÃO NO CONCRETO

Tratamentos superficiais:

Para MEIRA (2017, abud KEER, 1992), os tratamentos superficiais para o concreto têm o objetivo de dificultar a entrada dos agentes agressivos no seu interior e, portanto, prolongar a vida útil da estrutura. Esses tratamentos devem equilibrar o seu caráter de barreira contra a entrada de agentes agressivos com a possibilidade de saída do vapor de água, ou seja, devem permitir que o concreto "respire".

As formas de atuação dos tratamentos superficiais são esquematicamente apresentadas na Figura 13 onde é possível ver a forma de atuação das pinturas e selantes (a), dos hidrofugantes (b) e dos bloqueadores de poros (c). Aqui não se levou em consideração a possibilidade de aplicação de uma camada de revestimento sobre o concreto, que também é uma forma de proteção MEIRA (2017, abud KEER, 1992).

Figura 13 - Tipos de tratamento superficiais: pinturas e selantes (a), hidrofugantes (b), bloqueadores de poros (c).



Fonte: Meira, (2017) abud Keer (1992).

As pinturas e selantes costumam ser polímeros e são usados para reduzir ou bloquear o transporte de CO_2 , e íons cloreto, formando um filme sobre a superfície do concreto. A eficiência desses materiais está relacionada com a execução correta na sua aplicação, propiciando assim boa aderência e grande durabilidade ao longo do tempo. Os hidrofugantes têm o objetivo de reduzir a absorção capilar e, com isso, reduzir a entrada de agentes agressivos dissolvidos na água. Como não fecham os poros, permitem a entrada de gases. Os bloqueadores de poros são materiais que penetram nos poros superficiais e reagem quimicamente com compostos hidratados, bloqueando os poros superficiais. O silicato de sódio é um desses bloqueadores, o qual reage com o hidróxido de cálcio para formar CSH e carbonato de sódio.

Tabela 5 - Tipos de tratamento superficial e suas características.

Tipo de tratamento	Material	Apresentação Comercial
Pinturas e Selantes	Acrílico Epóxi Poliéster Polietileno Poliuretano Vinil	Tinta Resina Emulsão Selante
Hidrofugantes	Silicone Siloxano Silano Minerais	Soluções Dispersão
Bloqueadores de Poros	Silicato Fluoreto de Silício Dispersão com Cimento	Solução Dispersão

Fonte: Adaptado de Meira (2017).

Inibidores de corrosão:

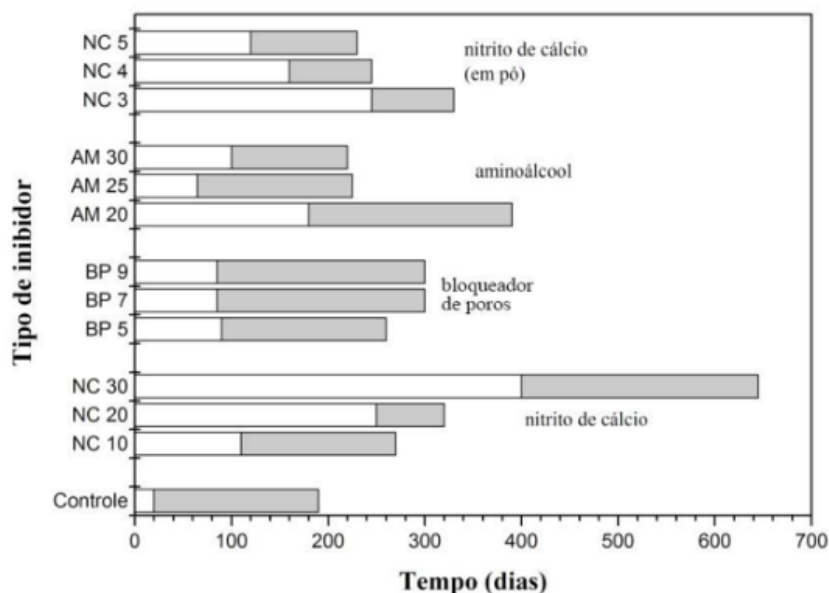
Para ELSENER (2000) os inibidores de corrosão são substâncias que, quando adicionadas em concentrações adequadas em sistemas corrosivos, têm a função de reduzir a corrosão de estruturas, como armaduras de concreto. Eles agem quimicamente ou eletroquimicamente na proteção da armadura, não sendo classificados como inibidores aqueles que apenas impedem a entrada de agentes agressivos ou reduzem a porosidade do concreto.

Existem dois métodos principais de aplicação desses inibidores: diretamente na mistura de concreto fresco ou superficialmente no concreto já endurecido. Quando aplicados na mistura fresca, eles atuam preventivamente, especialmente em ambientes altamente agressivos. Já os inibidores aplicados superficialmente podem funcionar tanto como prevenção, caso a corrosão ainda não tenha ocorrido, quanto como tratamento corretivo, desacelerando um processo já em andamento.

Os inibidores de corrosão são classificados conforme seu modo de atuação: anódicos, catódicos ou mistos, dependendo de qual parte do processo de corrosão eles afetam (ANDRADE, 1988). Eles também podem ser categorizados em três grupos: inibidores de adsorção, inibidores de formação de película, e inibidores de

passivação (BERTOLINI et al., 2004). A Figura 14 apresenta resultados comparativos do desempenho de alguns desses inibidores.

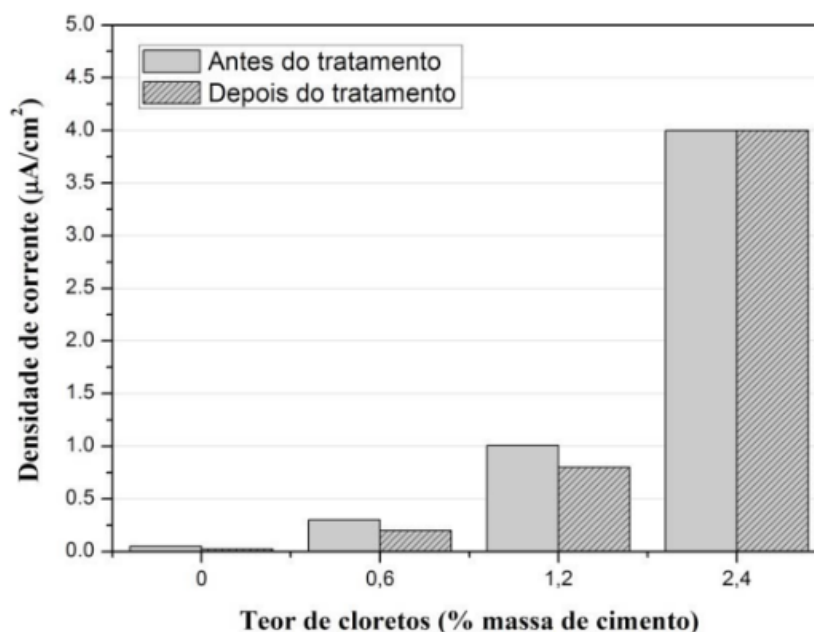
Figura 14 - Tempo para iniciar a corrosão de armaduras em corpos de prova de argamassa expostos a soluções de cloretos para quatro distintos inibidores, com três diferentes quantidades cada um.



Fonte: Trépanier, Hope e Hansson (2001).

Dentre os inibidores mais utilizados, o nitrito de cálcio se destaca por seu efeito passivante, mas sua eficácia depende de sua concentração adequada em relação à presença de cloretos. Inibidores à base de aminas também são usados, atuando como inibidores catódicos ou mistos. Um inibidor de aplicação superficial, como o mono flúor fosfato de sódio (MFF), é eficaz na prevenção e na redução da corrosão em armaduras, mas enfrenta desafios de penetração no concreto. A Figura 15 mostra os resultados com o MFF nos quais é possível verificar que a sua eficiência como produto de aplicação depende da quantidade de cloretos que há no concreto e do tempo de tratamento.

Figura 15 - Taxa de corrosão de armaduras em corpos de prova de concreto antes e depois do tratamento com MFF.



Fonte: Ngala, Page e Page (2003).

A eficiência dos inibidores de corrosão depende tanto do tipo de inibidor quanto da sua concentração e forma de aplicação, sendo essencial garantir que atinjam a armadura em quantidades suficientes para proteger contra a corrosão.

Tratamentos sobre o aço:

Dos tratamentos superficiais aplicados às armaduras, os mais comuns são a pintura com resinas de base poliméricas e a galvanização da armadura.

A técnica de pintura polimérica, desenvolvida nos anos 70 na América do Norte, mostrou-se eficaz na prevenção da corrosão em estruturas de concreto expostas à carbonatação e à contaminação por íons cloreto (BERTOLINI *et al.*, 2004). No entanto, para garantir sua eficiência, a pintura precisa cobrir toda a armadura de forma uniforme, com espessura adequada, sem comprometer a aderência ao concreto, além de ser resistente e flexível para suportar os esforços aplicados à estrutura.

Falhas na aplicação da pintura podem expor a armadura à corrosão, especialmente em ambientes com presença de cloretos. Nessas situações, os íons cloreto podem infiltrar-se por pequenas falhas na pintura, se movimentar por baixo dela e aumentar a área corroída. A espessura recomendada para a aplicação desse

tipo de proteção está entre 180 e 300 μm micrómetro Meira, (2017 abud AASHTO, 2009), o que equivale a aproximadamente 0,2 e 0,3mm milímetros. Espessuras mais finas podem comprometer a eficiência dessa proteção, como observaram Meira, (2017 abud Lawler e Krauss, 2011) na avaliação de pontes com cerca de 35 anos, na Virginia - EUA, onde se aplicou esse tipo de proteção (Figura 16).

Figura 16 - Armaduras com pintura epóxi, com e sem corrosão.



Fonte: Lawler e Kraus (2011).

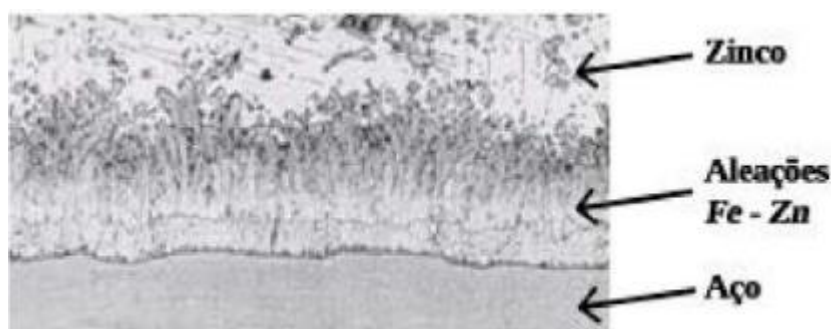
Outros dois pontos importantes em relação a esse tipo de proteção são os seguintes: no caso de falhas na pintura, taxas de corrosão muito elevadas podem ocorrer na presença de macro células, como é o caso do uso combinado de armaduras com e sem pintura epóxi em uma mesma estrutura, em que as primeiras atuam como cátodos, um outro ponto é que, como as armaduras pintadas comprometem a conexão elétrica entre elas, não se pode aplicar a proteção catódica no caso de falhas na pintura.

A galvanização das armaduras de concreto tem sido utilizada com sucesso desde a década de 1930, oferecendo vantagens importantes em relação às armaduras convencionais, como o aumento do tempo necessário para o início da corrosão e a possibilidade de uso em estruturas com baixa espessura de cobrimento (YEOMANS, 1991).

Esse processo de galvanização gera duas camadas na superfície da armadura: uma interna composta por ligas de ferro e zinco (Fe-Zn) e uma externa de zinco puro conforme ilustrado Figura 17. A proteção anticorrosiva se dá pela formação de um filme passivo na camada de zinco, que reduz a taxa de dissolução do material. A eficácia desse filme depende da espessura da camada de zinco e do pH do

ambiente. Segundo ANDRADE (1988), uma espessura ideal para essa camada de zinco puro varia entre 5 e 10 μm . Além disso, para que o filme passivo se forme adequadamente, o pH do meio deve estar entre 12 e 12,8, sendo essa a faixa ideal para que o filme seja mais compacto e eficiente. Já em pHs alcalinos abaixo de 13,3, ainda é possível a formação do filme, mas sua eficácia pode ser reduzida em cimentos com alto teor de álcalis, comprometendo a proteção.

Figura 17 - Estrutura da camada de galvanização.

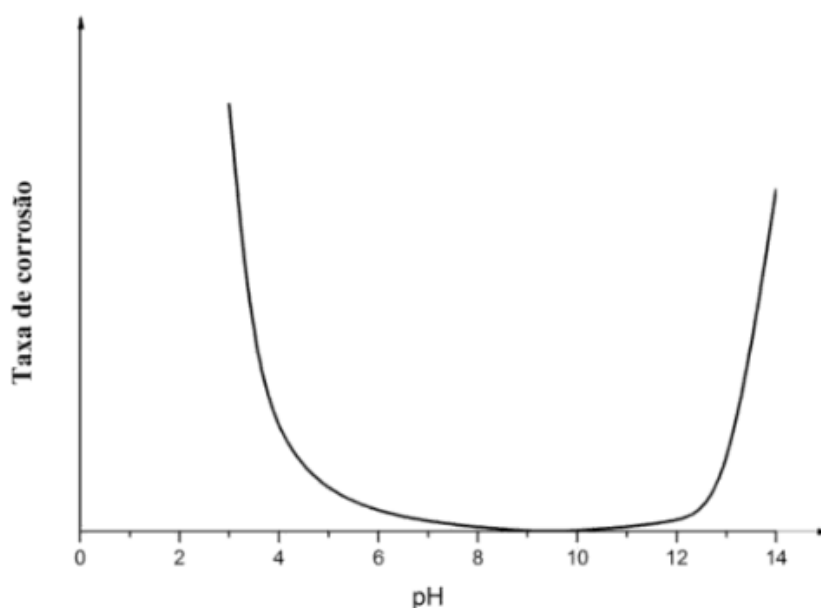


Fonte: Adaptado de González e Andrade (1982).

Quando o concreto é exposto à carbonatação, a redução do pH não é suficiente para causar altas taxas de corrosão, permitindo que a camada de zinco da armadura galvanizada permaneça passiva (Figura 18). Já na presença de cloretos, esses íons podem despassivar a camada de zinco em pontos específicos. No entanto, as armaduras galvanizadas são capazes de tolerar concentrações de cloretos significativamente maiores do que as armaduras convencionais.

O nível crítico de cloretos que causa a despassivação depende da espessura e da qualidade da camada de zinco. Estudos laboratoriais indicam que armaduras galvanizadas conseguem suportar concentrações de cloretos entre 0,5% e 2,3% da massa de cimento, o que representa uma resistência superior em comparação às armaduras comuns (DARWIN et al., 2009).

Figura 18 - Efeito do PH na taxa de corrosão do zinco puro.



Fonte: Adaptado de Castaño, Botero e Peñaranda (2007).

Uma vantagem significativa das armaduras galvanizadas é que, mesmo em caso de corrosão, a camada de zinco corrói em um ritmo mais lento, prolongando a vida útil dessas armaduras em comparação com as convencionais. Além disso, a aderência entre a armadura galvanizada e o concreto pode ser influenciada por fatores como a composição do cimento, a compactação, o processo de cura e a idade do concreto.

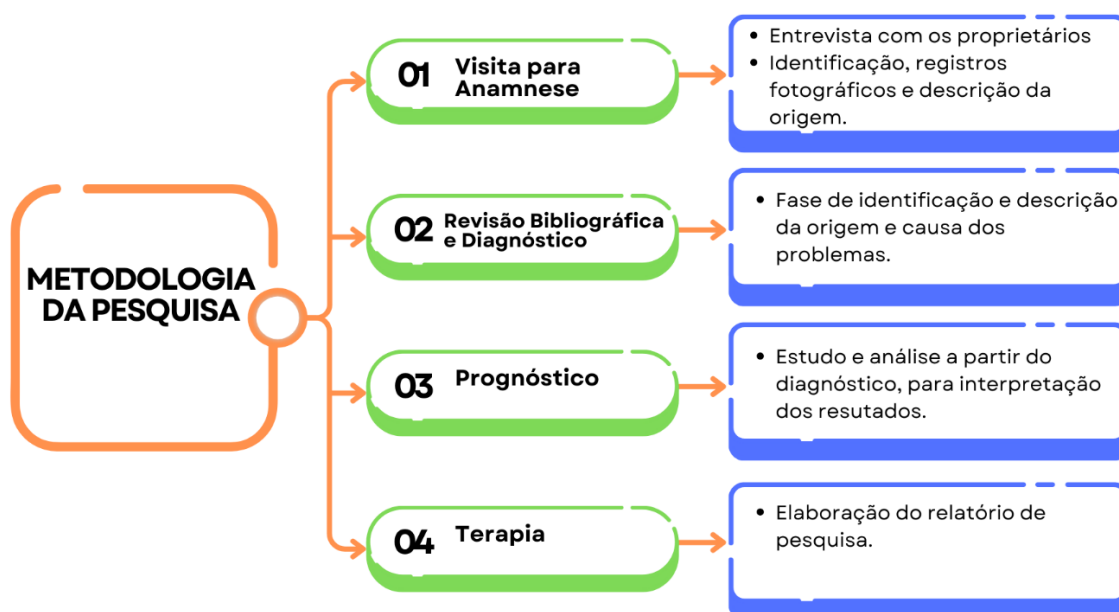
Embora alguns estudos apresentem resultados divergentes sobre o ganho ou a perda de aderência (BIRD, 1962), é possível obter uma boa aderência em idades mais avançadas do concreto. Isso ocorre devido à formação de cristais de hidrozincato de cálcio, que atuam como pontes de ligação entre a camada de zinco da armadura e o concreto, melhorando a aderência com o tempo (FRATESI; MORICONI; COPPOLA, 1996).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram selecionados como locais de estudo algumas residências, um prédio comercial com apartamentos para aluguel e uma igreja, todos localizados no município de Pau dos Ferros – RN. A metodologia incluiu uma revisão de literatura, abrangendo artigos, livros, teses, dissertações e fontes acadêmicas online. Além disso, foram realizadas visitas aos locais estudados, com o objetivo de aprofundar a análise do processo corrosivo.

Durante as visitas, foi feita a observação da situação atual da corrosão por meio de inspeções visuais e registros fotográficos. Essas inspeções serviram para coletar dados que, posteriormente, permitiram identificar as causas do problema e propor soluções adequadas para a questão abordada. A Figura 19 ilustra detalhadamente as etapas da metodologia de pesquisa aplicada neste estudo.

Figura 19 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.



Fonte: Autoria Própria (2024).

▪ Características da Região

Esse estudo refere-se a corrosão presente nas estruturas de concreto armado, mais especificamente pilares das edificações. Situadas, na Mesorregião Oeste Potiguar do estado do Rio Grande do Norte como mostra a Figura 20,

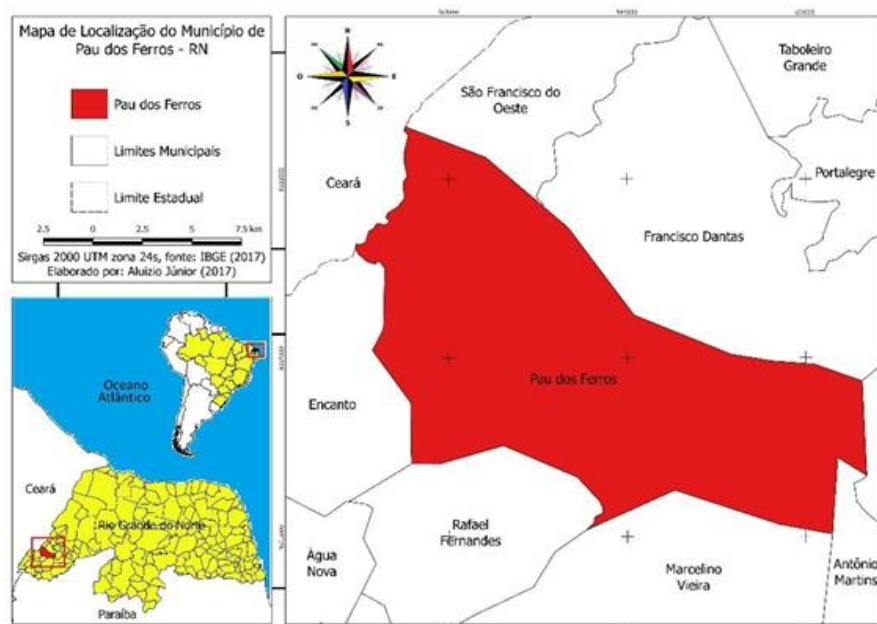
especificamente na microrregião de Pau dos Ferros – RN. Localizando-se a 389 Km a oeste da capital Natal - RN, com população de 30.479 habitantes (IBGE, 2022).

As margens da BR-405, um importante polo comercial, estão localizadas no semiárido brasileiro, uma região que se caracteriza por condições climáticas específicas, como altas temperaturas, baixa umidade, escassez e irregularidade das chuvas, além de elevadas taxas de evaporação. De acordo com GURGEL (2018), o clima da região é do tipo Megatérmico Subúmido Seco, com temperatura média anual em torno de 26 °C e precipitação média de 697,8 mm, concentrada nos meses de fevereiro a maio.

Segundo JACOMINE *et al.*, (1971), o município de Pau dos Ferros apresenta solos como o argissolo vermelho-amarelo equivalente eutrófico, o luvisolo e o neossolo litólico eutrófico. Conforme QUEIROZ (2014), também podem ser encontrados o podzólico vermelho-amarelo equivalente eutrófico, caracterizado por alta fertilidade e boa drenagem, além do latossolo vermelho-amarelo, planossolo háplico e planossolo nátrico.

Toda a área estudada está inserida na bacia hidrográfica do rio Apodi/Mossoró. A cobertura vegetal predominante é a caatinga, composta por espécies de pequeno porte, adaptadas a períodos de seca. Essas plantas possuem folhas pequenas e caducas, que caem durante a estiagem, como forma de preservação de água.

Figura 20 - Mapa da localização geográfica de Pau dos Ferros – RN.

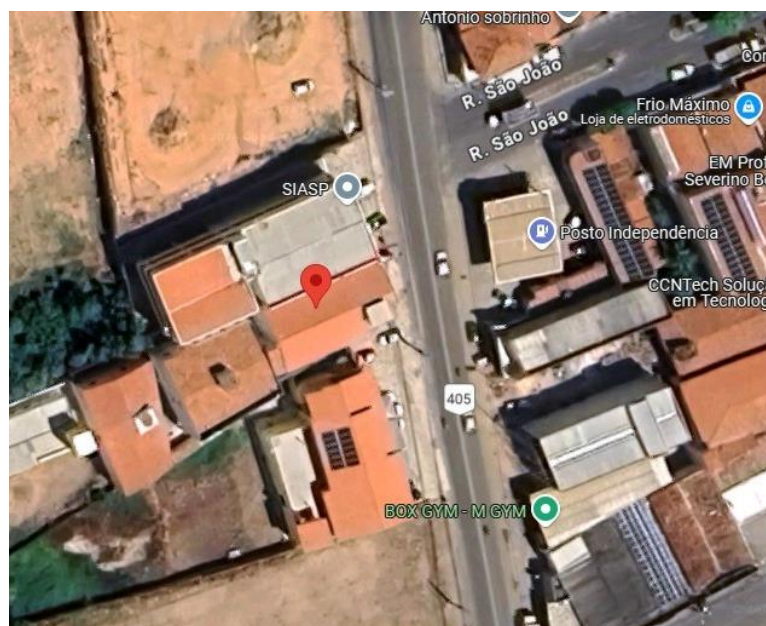


Fonte: Elaborado por Aluizio Júnior a partir de dados do IBGE(2017).

▪ Características das Edificações

O prédio de aluguel em questão, possui dois pavimentos, com estacionamento no térreo, e cada pavimento contém quatro apartamentos, totalizando oito unidades, as Figuras 21 e 22 mostram a localização geográfica do prédio e a sua fachada. A igreja foi construída em uma área de alta umidade, que, segundo moradores locais, era anteriormente um lago que foi aterrado, as Figuras 23 e 24 mostram a localização geográfica da igreja e sua fachada. A residência multifamiliar também está situada em uma área que outrora foi aterrada e loteada, apresentando condições semelhantes de umidade, as Figuras 25 e 26 mostram a localização geográfica e a sua fachada.

Figura 21 – Localização geográfica do prédio.



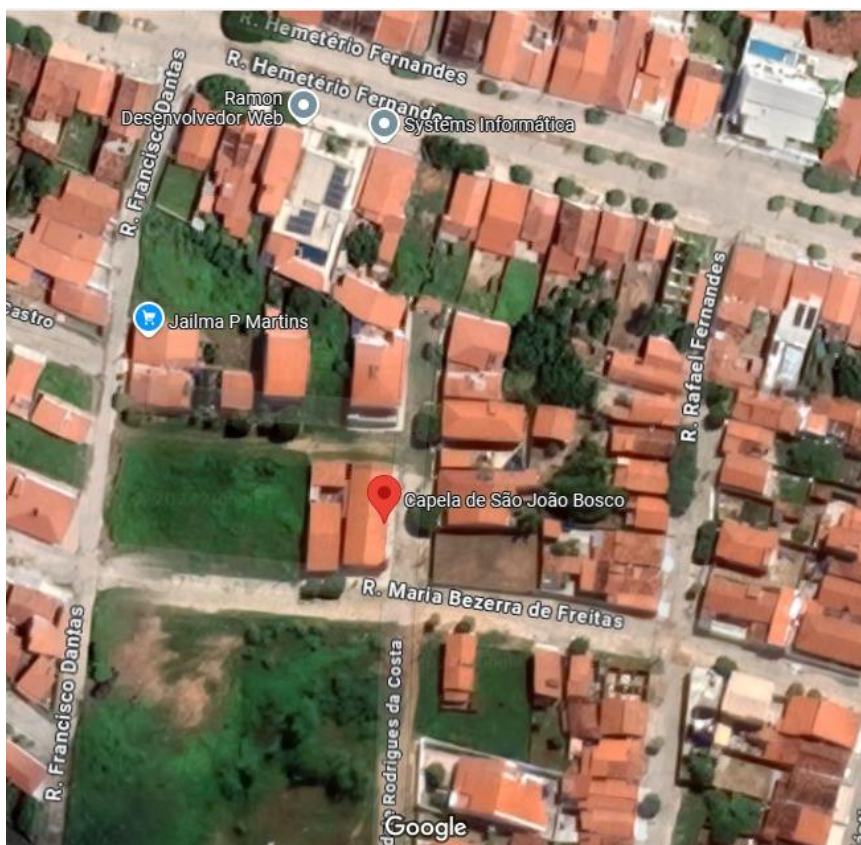
Fonte: Google Maps (2024).

Figura 22 - Fachada frontal e lateral do prédio.



Fonte: Google Maps (2024).

Figura 23 - Localização geográfica da igreja.



Fonte: Google Maps (2024).

Figura 24 - Fachada frontal da igreja.



Fonte: Google Maps (2024).

Figura 25 - Localização Geográfica da residência multifamiliar.



Fonte: Google Maps (2024).

Figura 26 - Fachada frontal e lateral da residência multifamiliar.



Fonte: Google Maps (2024).

Entre 2009 e 2011, a região enfrentou uma crise hídrica, o que levou ao uso de água com alto teor de cloretos por um período, com uma coloração avermelhada, água esta, que em tão pouco tempo acabava e oxidava com torneiras, chuveiros,

cerâmicas. Com a chegada da UFERSA (Universidade Federal Rural do Semi-Árido), houve um grande crescimento urbano em Pau dos Ferros – RN e, com isso, o surgimento em massa de novos loteamentos e construções, que posteriormente seriam destinadas ao aluguel. Naquela época, a cidade ainda carecia de um plano diretor, o que resultou em obras realizadas de maneira desordenada, acompanhando o rápido desenvolvimento urbano. Como consequência, alguns anos depois, muitas dessas edificações começaram a apresentar patologias construtivas, tanto visuais quanto estruturais.

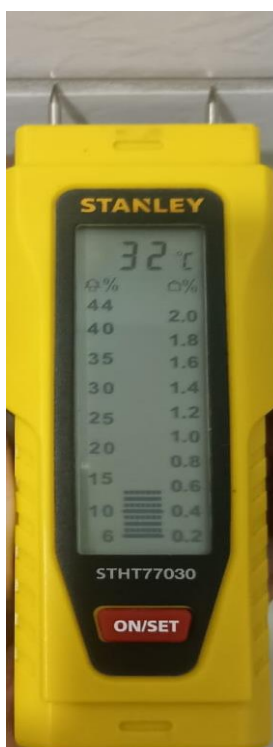
Para compreender detalhadamente os problemas nas construções, foram realizadas três visitas no prédio multifamiliar no intervalo de quinze dias, na igreja e na residência unifamiliar, foram realizadas duas visitas por semana, durante um mês sempre na presença de uma engenheira civil e química, especialista, atuante em patologias construtivas que estava responsável pelo acompanhamento técnico do tratamento paliativo/corretivo, que tem por finalidade corrigir o problema neutralizando o processo corrosivo em seu estágio avançado. Essa profissional auxiliou na identificação das condições corrosivas e de outras patologias presentes nas edificações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTRUTURA FÍSICA DO OBJETO DE ESTUDO

Para a realização da anamnese, foram feitas visitas aos locais de estudo para coletar informações junto aos moradores, realizar uma análise tátil-visual com o auxílio de um medidor de umidade. O medidor, é uma ferramenta composta de duas agulhas que são inseridas no substrato, e uma tela no qual temos as informações através de uma escala digital, para superfícies de base cimentícia deve-se analisar a escala do lado direito que varia de 0.2% a 2.0% apresentado nas Figuras 27 e 28. A utilização do medidor de umidade se dá a partir de métodos empíricos, pois como não há normas para sua utilização chegamos a valores adequados para constatação de uma umidade ativa por tentativas e erros. Com isso, temos que, para uma parede ser considerada sã, no medidor, olhando para os valores do lado direito do aparelho, a marcação central esteja entre 0.4% a 0.6%.

Figura 27 – Medidor de umidade sob substrato sem manifestação patológica.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 28 – Teste de umidade no substrato com a manifestação patológica, observa-se a detecção de umidade na escala de 1.8%.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Portanto, foi utilizado para confirmar a ação da capilaridade da água, na influência e potencialização do processo corrosivo, e registrar imagens fotográficas, conforme as etapas previstas no fluxograma da metodologia da pesquisa.

Em todas as aferições realizadas, constatou – se valores acima de 1.0, o que já nos confirma com muita clareza uma presença relevante de água naquele substrato.

Durante as inspeções, constatou-se um processo corrosivo avançado nos pilares do prédio, evidenciado por fissuras alinhadas com as barras longitudinais, uma característica comum de corrosão em estruturas de concreto armado, como ficam evidenciadas nas Figuras 29 e 30. Além disso, o substrato dos pilares apresentava sinais de deterioração e com pouca aderência, como apresentado nas figuras 31 e 32.

Figura 29 - Pilar de “canto”, do prédio com fissuras verticais alinhadas com as barras longitudinais.



Fonte: Aatoria própria (2022).

Figura 30 – Outro Pilar de “canto” com fissuras verticais alinhadas com as barras longitudinais.



Fonte: Aatoria própria (2022).

Figura 31 - Pilar em estágio avançado de deterioração.



Fonte: Autoria própria (2022)

Nas residências unifamiliares e na igreja, também foram observados indícios de corrosão nos pilares, acompanhados de manchas de umidade por capilaridade, presença de mofo, bolor e salitre, entre outros problemas. Como podem ser vistos nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Substrato com presença de salitre, manchas de umidade e corrosão de armadura na residência unifamiliar.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 33 - Substrato com mancha de umidade, salitre, fungo e bolor na igreja.



Fonte: Autoria própria (2024).

Entre as edificações visitadas, ficou evidente que a situação do prédio era a mais preocupante, uma vez que se trata de um edifício utilizado para aluguel residencial. Sabendo que os pilares são projetados para resistir a esforços de tração devido à presença das barras de aço, o avançado estado de corrosão sugere-se provavelmente, na redução da seção das barras, o que compromete a capacidade de resistência dos pilares. Essa condição coloca a estrutura em risco de colapso, expondo os moradores a uma situação de perigo.

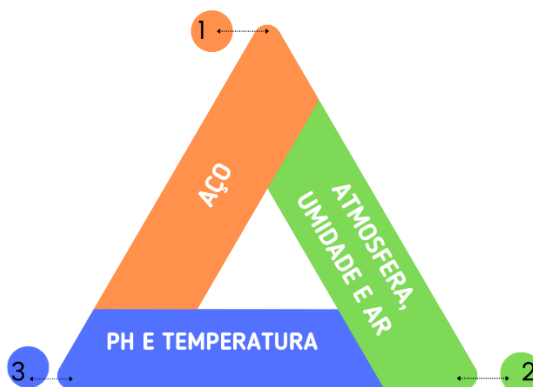
5.2 TRIÂNGULO DA CORROSÃO NOS LOCAIS DE ESTUDO

As variáveis presentes em um ambiente corrosivo, como velocidade, temperatura e composição do fluido, podem exercer uma influência significativa nas propriedades de corrosão dos materiais que estão expostos a esse ambiente. Por isso, é apropriado classificar os tipos de corrosão com base em sua forma de manifestação, conforme destacado por (CALLISTER, 2020).

Como vimos neste estudo, devido as manifestações patológicas que desencadearam as reações de corrosão definiu-se por características, que as formas de corrosão encontradas foram, corrosão generalizada uniforme, localizada, por pites e com formação de fissuras.

Na análise realizada sobre o triângulo da corrosão no local estudado, classifica-se o meio, como o meio atmosférico, devido ao alto nível de umidade observado. Em relação ao metal, constatou-se o uso de aço como elemento estrutural no concreto. As condições operacionais a que as peças estão sujeitas envolvem fatores como esforço mecânico, pH, temperatura e a ausência de manutenção. A Figura 34 ilustra o triângulo da corrosão identificado no local.

Figura 34 - Triângulo da corrosão aplicado ao ambiente.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5.3 CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DO PRÉDIO

O edifício em questão foi executado em meados de 2010 a 2011, onde tem-se o estacionamento no térreo e dois pavimentos, contendo cada um, 4 apartamentos (Figura 35).

Figura 35 - Fissuras de corrosão nas armaduras longitudinais dos pilares do prédio.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Como pode-se observar na Figura 35, ficam evidenciadas as fissuras por corrosão nas barras longitudinais dos pilares do prédio. Um detalhe importante, é que em entrevista com o responsável das manutenções, foi informado que os pilares já haviam sido reparados em 2017, que segundo informações, foram escarificados e rebocados novamente aumentando o tamanho da seção dos pilares. O que fica claro que, de forma indireta e sem embasamento científico, aumentaram a espessura do cobrimento sobre a barra com o intuito de não se ter mais fissuras. Porém, como os pilares já estavam em processo avançado de corrosão, deveria – se ter sido tratado de forma adequada, iniciando pelo lixamento e em seguida se neutralizaria a formação de ferrugem a partir de um neutralizador, e em seguida aplicaria o zarcão com a finalidade de proteger a barra de aço do contato com a umidade e os agentes agressivos. Se após o lixamento for notado que a barra perdeu 10% de sua seção, neste caso faz – se necessário o reforço estrutural ou substituição da barra. O Quadro 1, sumariza o diagnóstico das patologias encontradas nos pilares.

Quadro 1 - Diagnóstico de manifestação patológica no Prédio Multifamiliar.

SINTOMAS	CAUSAS	ORIGENS	MECANISMOS
Fissuras	Penetração de agentes agressivos	Projeto execução Material	Reação expansiva da armadura

Fonte: Autoria própria (2024)

5.3.1 FORMAS DE CORROSÃO NO PRÉDIO

A Figura 36 a seguir, apresenta a corrosão ao longo de toda superfície da barra uniformemente.

Figura 36 - Corrosão uniforme ao longo de toda superfície do aço.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Por apresentar características de uma despassivação do aço por carbonatação, temos penetração de agentes agressivos ocasionando reação do dióxido e carbono (CO_2) com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente no cimento hidratado, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) reduzindo assim, o pH do concreto para valores inferiores a 9. Neste tipo de reação temos uma corrosão uniforme ou generalizada, onde o ataque se estende sobre toda superfície do metal, e devido aos inúmeros ânodos e cátodos existente ao longo da barra, tem – se, a formação de uma micropilha. Nesse caso, a perda de seção pode ser uniforme ou irregular com formação de fissuras.

5.4 CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR.

No estudo de caso em questão os proprietários já haviam iniciado uma reforma, porém resolveram chamar a engenheira para uma vistoria acerca dos problemas encontrados, umidade no rodapé por capilaridade com alta elevação, presença de salitre muito forte e pilares já expostos tanto por causa da agressividade da corrosão existente como pela escarificação feita na reforma. Os proprietários residem há 19 anos no local, confirmaram a ausência de impermeabilização dos baldrame, bem como a existência dos projetos de execução. A Figura 37 representa os pilares da residência com alto grau de deterioração e o Quadro 2 sumariza o diagnóstico das patologias encontradas nos pilares.

Figura 37 - Pilares com alto nível de degradação devido a corrosão de armaduras.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Quadro 2 - Diagnóstico de manifestação patológica na residência unifamiliar.

SINTOMAS	CAUSAS	ORIGENS	MECANISMOS
Desplacamento do concreto Corrosão de armaduras Perda de seção da armadura	Carbonatação Presença de cloretos	Projeto Execução Material Uso	Reação expansiva da armadura

Fonte: Autoria própria (2024).

5.4.1 FORMAS DE CORROSÃO NA RESIDÊNCIA

Por apresentar características de despassivação do aço por íons cloretos, temos a corrosão por pites, localizada, a uniforme e com formação de fissuras. Para identificar a presença e a profundidade de íons cloreto no concreto, deveria – se ter feito o ensaio por meio da aspersão do nitrato de prata (AgNO_3), onde a região aspergida ficaria esbranquiçada. Como foi confirmado a ausência de projeto executivo, impermeabilização das vigas baldrame e a falta de cobrimento ideal nos pilares, de forma empírica, constatou - se pela grande quantidade de manchas, eflorescência e salitre que se tratava de uma corrosão bastante agressiva, onde a barra facilmente perde 10% da sua espessura e com isso faz – se necessário a substituição e reforço estrutural. Porém como os proprietários não quiseram, sugeriu – se a manutenção corretiva com o controle da corrosão, sem o reforço estrutural. A Figura 38 a seguir evidencia o processo de corrosão e detalha os estribos rompidos, resultante dessa patologia corrosiva.

Figura 38 - Pilar em processo corrosivo bastante agressivo.

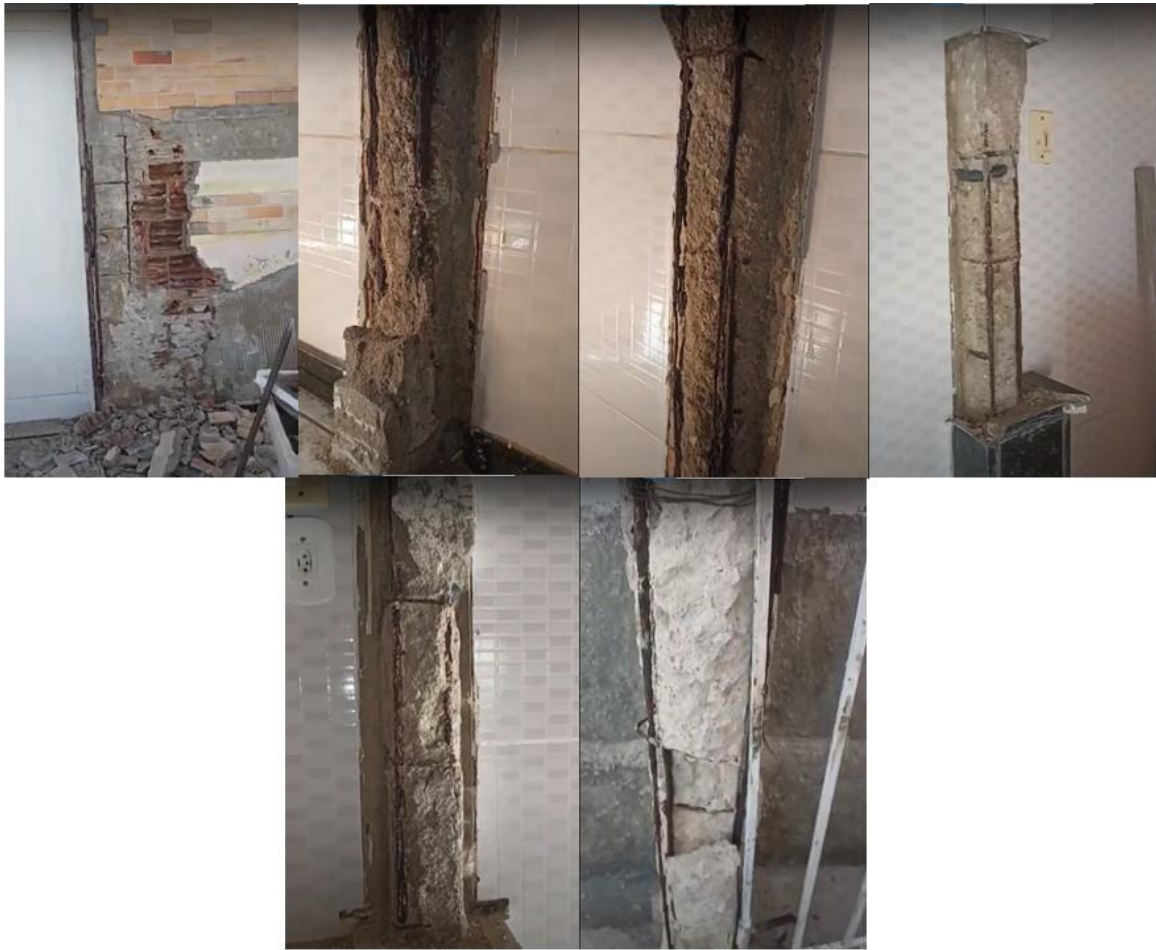


Fonte: Autoria Própria (2024).

5.5 CORROSÃO NOS PILARES DE CONCRETO ARMADO DA IGREJA.

A Figura 39 apresenta os pilares da igreja em avançado e agressivo estágio de corrosão, onde fica nítido a ausência de estribos e a perda de seção das barras e o Quadro 3 sumariza o diagnóstico das patologias encontradas nos pilares.

Figura 39 - Pilares com alto nível de degradação devido a corrosão das armaduras.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Neste estudo de caso, foi constatado a corrosão em pilares, pois ambos eram revestidos de cerâmica, porém já apresentavam fissuras e cerâmicas ocas devido a expansão da ferrugem e umidade por capilaridade. Constatou-se também a ausência de projetos executivos, bem como a falta de impermeabilização do baldrame.

Quadro 3 - Diagnóstico de manifestação patológica na Igreja.

SINTOMAS	CAUSAS	ORIGENS	MECANISMOS
Deslocamento do concreto Corrosão de armaduras Perda de seção da armadura	Carbonatação Presença de cloretos	Projeto Execução Material Uso	Reação expansiva da armadura

Fonte: Autoria própria (2024).

5.5.1 FORMAS DE CORROSÃO IGREJA

Durante as inspeções, foi constatada uma situação de degradação acentuada, principalmente nos pilares, onde a corrosão se encontra em estágio avançado, expondo as armaduras ao ambiente externo. Também foram observados deslocamento das cerâmicas e do concreto nos pilares. Em algumas situações as fissuras eram pequenas o que, em alguns casos apresenta menor nível de deterioração, porém, toda a estrutura mapeada com as fissuras, estão comprometidas pelo processo corrosivo. De forma análoga a situação da residência unifamiliar, foi constatado as formas de corrosão por pites, localizada, uniforme e com formação de fissuras.

A Figura 40 representa um dos pilares da igreja, no qual a cerâmica já estava comprometida pelo efeito expansivo da ferrugem, o concreto degradado e corrosão total da armadura.

Figura 40 - Pilar com alto nível de degradação e sem estribos.



Fonte: Aatoria Própria (2024).

Nas edificações analisadas, observou – se a presença de manchas de umidade no rodapé, geralmente ao longo de todo o perímetro. As condições ambientais da cidade, incluindo o tipo de solo e a qualidade da água utilizada, que apresenta altos teores de cloretos, exercem grande influência na velocidade desse processo corrosivo, o que eleva nosso estudo a um grau de importância tanto para os profissionais da construção civil, quanto para os proprietários das edificações e os residentes da cidade pois o entendimento sobre formas de prevenção e manutenção, evita o desconforto e diminui a probabilidade de uma manifestação patológica. Nos três estudos, constatou-se a necessidade de uma manutenção corretiva com reforço estrutural, extremamente mais cara e demorada se comparado com a preventiva.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização desta pesquisa, foi possível entender não apenas como a corrosão se manifesta, mas também suas causas e os efeitos devastadores que ela provoca nas estruturas, além dos impactos negativos que isso pode gerar na sociedade. Além disso, o estudo ressaltou a importância do planejamento preventivo, visando prolongar a vida útil das estruturas e garantir o seu desempenho adequado. Ao seguir os critérios mínimos de durabilidade e trabalhabilidade estabelecidos em projetos, é possível evitar o elevado custo econômico decorrente de manutenções corretivas.

A realização deste estudo proporcionou um conhecimento aprofundado sobre o processo de corrosão na região, destacando como ele ocorre em nosso cotidiano e nas situações mais recorrentes. O estudo confirmou a problemática relacionada à falta de mão de obra qualificada, além do impacto negativo que essa carência pode gerar em um curto período de tempo. Dessa forma, este trabalho contribui positivamente para um melhor planejamento executivo de obras no semiárido, visando prolongar a vida útil dos edifícios em utilização e para as novas construções.

Nos ambientes analisados, os tipos de corrosão mais frequentemente encontrados foram: corrosão uniforme, corrosão por pites, localizada e com formação de fissuras. As condições ambientais da cidade, incluindo o tipo de solo e a qualidade da água utilizada, que apresenta altos teores de cloretos, exercem grande influência na velocidade desse processo corrosivo.

▪ Sugestões para trabalhos futuros

A compreensão dos mecanismos de corrosão é vital para a preservação de infraestruturas, equipamentos e objetos metálicos, assegurando sua durabilidade. Além disso, a educação sobre os processos corrosivos e as estratégias de prevenção são cruciais para mitigar os efeitos adversos desse fenômeno, garantindo um ambiente mais seguro e sustentável. Promover o uso de técnicas adequadas e materiais corretos, além de realizar manutenções preventivas, podem minimizar consideravelmente os danos causados pela corrosão, proporcionando maior segurança e eficiência nas construções e infraestruturas.

Sugere-se trabalhos futuros para o estudo da corrosão em edificações que envolva identificar áreas de pesquisa que possam contribuir para uma compreensão

mais profunda dessas especificidades e seu impacto em diferentes contextos, seguindo algumas sugestões de trabalhos futuros relacionados à corrosão.

A influência da utilização de aditivos hidrofugantes em estruturas de concreto armado na sua durabilidade: Pesquisar e comparar como a utilização deste aditivos não modificam o pH do concreto, aumentando assim a sua vida útil e combatendo problemas comuns bem como a corrosão.

A vantagem econômica para as construções através do estudo aprofundado sobre a corrosão em estruturas de concreto armado: Analisar critérios econômicos comparando as vantagens de preferir uma manutenção preventiva ou invés da corretiva.

O controle do pH do concreto no combate a corrosão de estruturas de concreto armado: Aqui realiza-se um estudo base em todas as normas brasileiras que estabelecem critérios de execução, que produto usar, qual melhor fator a/c entre outras observações para se ter uma peça estrutural em ótimo estado e sem patologias.

Um estudo social sobre a corrosão das estruturas em concreto armado: Elaborar uma cartilha educativa para profissionais e clientes sobre quais itens observar, escolher na sua obra, visando prevenir a corrosão em estruturas de concreto armado para obras com características da região Semiárida.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 14037: **manual de operação, uso e manutenção das edificações – conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação**. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT. NBR 15575: **Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. NBR 5674: **Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

ALIOFKHAZRAEI, Mahmood (Ed.). **Corrosion inhibitors, principles and recent applications**. 2018.

ANDRADE, J. D. **Corrosão e seu impacto nas estruturas metálicas**. São Paulo: Editora Técnica, 1988.

ARIVABENE, Antonio Cesar. **Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso**. *Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia*, v. 3, n. 10, p. 1-22, 2015.

BARROS, P. R. C.; FURLAN, L. C.; MOURA, D. P.; ARANA, G. L. M.; MOURA, A. F. M. **Proteção catódica de estruturas de concreto**. *In: 16º Congresso Brasileiro de Corrosão e Proteção, 2016*. São Paulo: Associação Brasileira de Corrosão, 2016. p. 1-12.

BERTOLINI, L. *et al.* **Corrosão do Aço no Concreto – Prevenção, Reparação e Diagnóstico**. Wiley-VCH: Viernheim, 2004.

BERTOLINI, L.; SHU, W. Y. **Efeitos da extração eletroquímica de cloreto nas propriedades químicas e mecânicas de pasta de cimento hidratada.** Advances in Cement Research, v. 8, p. 93-100, 1996.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: Patologia, reabilitação e prevenção.** Oficina de Textos, 2016.

BIRD, C. E. Bond of Galvanized Steel Reinforcement in Concrete (**Adesão de Reforço de Aço Galvanizado em Concreto**). Nature, v. 194, p. 798, 1962.

BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas.** Oficina de Textos, 2019.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.** Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521637325/>. Acesso em: 28 set. 2024.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Pini, 1999.

CIRINO, Miguel Adriano Gonçalves et al. **Avaliação das manifestações patológicas das edificações do departamento de engenharia de alimentos da Universidade Federal do Ceará.** Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e481974424-e481974424, 2020.

CUNHA, Adriano Ferreira da et al. **Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 59, p. 111-116, 2006.

DA SILVA MOREIRA, Renata Ferreira. A corrosão e seus aspectos na engenharia civil. **Revista Obras Civis**, v. 7, n. 1, p. 36-40, 2015.

DARWIN, D. et al. **Limiar crítico de corrosão por cloreto de barras de reforço galvanizadas**. ACI Materials Journal, v. 106, n. 2, p. 176-183, 2009.

DE MORAIS, João Marcos Pereira et al. **Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão**. Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e759974964-e759974964, 2020.

DE SOUZA, Marcos Ferreira. **Patologias ocasionadas pela umidade nas edificações**. Monografia (Especialização em Construção Civil: Avaliações e Perícias), Departamento de Engenharia de Materiais de Construção, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

DO NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante. Corrosão em armaduras de concreto. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 3, n. 1, p. 177-188, 2015.

DONADIO, J. A. M.; MENEZES, L. F.; FERRAZ, D. F.; MENEZES, L. F.; NOGUEIRA, R. C.; FERNANDES, J. F. **Gestão Total da Corrosão**. Análise Documental. *ALCONPAT Journal*, v. 13, n. 2, p. 60-71, 2023.

ELSENER, B. **Inibidores de corrosão para aço em concreto**. Em: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MATERIAIS AVANÇADOS, 2000, Munique. Anais... Munique, 2000, p. 1-8 (palestra principal).

FERREIRA, C. A., & PONCIANO, J. A. C. (2011). **Corrosão e Degradação dos Materiais**. Elsevier.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2022.

GOMIDE, Tito L. F., PUJADAS, Flávia Z.A., NETO, Jerônimo C.P.F. **Técnicas de inspeção e manutenção predial: vistorias técnicas, check-up predial, normas comentadas, manutenção X valorização patrimonial, análise de riscos**. São Paulo, Editora PINI, 2006.

GURGEL, A. L.; MEDEIROS, J. F. de. **CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE PAU DOS FERROS – RN.**

HELENE, PR do L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. **São Paulo**, v. 231, p. 14, 1993.

JACOMINE, P. K. T; SILVA, F. B. R; FORMIGA, R. A.; ALMEIDA, J. C.; BELTRÃO, V. A.; PESSÓA, S. C. P.; FERREIRA, R. C. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte.** Recife: SUDENE-DRN, 1971.

KEER, J. G. **Tratamentos de superfície.** Em: MAYS, G. (Ed.). **Durabilidade de estruturas de concreto.** Londres: E & F Spon, 1992. p. 146-169.

LAWLER, J. S.; KRAUSS, P. D. **Desempenho de campo de 35 anos de barras de reforço revestidas com epóxi.** Concrete International, p. 26-37, nov. 2011.

MATLAKHOV, Anatoliy Nikolaevich; MATLAKHOVA, Lioudmila Aleksandrovna. **Corrosão e Proteção dos Materiais.** Paco e Littera, 2021.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de e ANDRADE, Jairo José de Oliveira e HELENE, Paulo R. L. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** Concreto: ciência e tecnologia. Tradução . São Paulo: IBRACON, 2022. . Disponível em:<https://repositorio.usp.br/directbitstream/ab4e45b7-4bce-4532-ada8e879ad52212b/Helene-2022-durabilidade.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2024.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção.** Editora IFPB, 2017.

NGALA, V.T.; PAGE, C. L.; PAGE, M. M. **Sistemas inibidores de corrosão para tratamento corretivo de concreto armado.** Parte 2: monofluorofosfato de sódio. Corrosion Science, v. 45, p. 1523-1537, 2003.

QUEIROZ, A. F. de. **Aspectos pedológicos das microrregiões de São Miguel, Umarizal e Pau dos Ferros**. In: Zoneamento Ecológico - Econômico do Alto Oeste Potiguar: microrregiões de Pau dos Ferros, São Miguel e Umarizal. / Organização José Elesbão de Almeida, Agassiel de M. Alves. – Mossoró, RN: Queima-Bucha, 2014.

RAMANATHAN, Lalgudi Venkataraman. **Corrosão e seu controle**. 1988.

RATESI, R.; MORICONI, G; COPPOLA, L. **A influência da galvanização do aço no comportamento de vergalhões em concreto**. In: PAGE, C. L.; FIGG, J. W. (Ed.). **Corrosão de armaduras em construção de concreto**. SCI/ The Royal Society of Chemistry: Cambridge, 1996. p. 630-641.

RIBEIRO, Daniel Vêras *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Editora Campus, 2014.

TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. 2011.

TRÉPANIER, S. M.; HOPE, B. B.; HANSSON, C. M. **Inibidores de corrosão em concreto. Parte III: Efeito no tempo para início da corrosão induzida por cloreto e taxa de corrosão subsequente do aço na argamassa**. Cement and Concrete Research, v. 3, p. 713-718, 2001.

TUTIKIAN, B.; PACHECO, M. **Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil**. ALCONPAT Internacional. Boletim Técnico nº 01. Unisinos, Brasil, 2013.

TUUTTI, K. (1982). **Corrosion of steel in concrete**. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

YEOMANS, S. R. **Estudos comparativos de reforço de aço galvanizado e revestido com epóxi em concreto**. ACI SP126-19, p. 355-370, 1991.