

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIZ EDUARDO SANTOS SILVEIRA

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO COM 40 ANOS NA REGIÃO
COSTEIRA DE ARACAJU: DESAFIOS E SOLUÇÕES NA COSTA SERGIPANA.**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2023

LUIZ EDUARDO SANTOS SILVEIRA

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO COM 40 ANOS NA REGIÃO
COSTEIRA DE ARACAJU: DESAFIOS E SOLUÇÕES NA COSTA SERGIPANA.**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Msc. Marcílio Fabiano
Goivinho da Silva

ARACAJU

2023

Ficha Catalográfica elaborada pela bibliotecária Elizabete T. Ramos - CRB-5 1028.
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silveira, Luiz Eduardo Santos

S587r Recuperação Estrutural em Edifício com 40 anos na Região Costeira de Aracaju: desafios e soluções na costa sergipana. Aracaju/SE. / Luiz Eduardo Santos Silveira. – Aracaju, 2023.

86 f. : il.

Orientador: Prof. Msc. Marcílio Fabiano Govinho da Silva. Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Patologias no Concreto Armado. 2. Recuperação Estrutural. 3. Corrosão Eletroquímica. 4. Ensaio não Destrutivo. 5. Manutenção Predial. I. Silva, Marcílio Fabiano Govinho da. II. Título.

CDU 628

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia N° 270

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO COM 40 ANOS NA REGIÃO
COSTEIRA DE ARACAJU : DESAFIOS E SOLUÇÕES NA COSTA SERGIPANA**

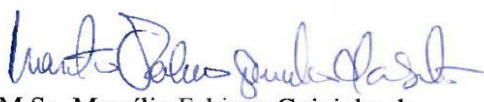
LUIZ EDUARDO SANTOS SILVEIRA

Esta monografia foi apresentada às 09 h 00 do dia 11 de DEZEMBRO de 2023 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. Dr. Carlos Henrique de Carvalho
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. Dr. Euler Wagner Freitas Santos
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da
Silva
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador


Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta grande conquista. Este projeto não teria sido possível sem o apoio, orientação e incentivo de muitas pessoas incríveis.

Primeiramente, quero agradecer a Deus pela sabedoria e motivação em cada passo dessa caminhada, a minha família e amigos, que estiveram ao meu lado durante toda a jornada acadêmica, agradeço por seu amor incondicional e apoio constante, cada palavra de encorajamento foi crucial para superar os desafios.

Ao meu orientador Prof. Marcílio, pela sua orientação sábia, paciência e dedicação ao longo deste processo. Suas sugestões valiosas e feedback construtivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos colegas de curso que compartilharam conhecimentos, experiências e momentos desafiadores. Juntos, enfrentamos os obstáculos e celebramos as conquistas, criando memórias que levarei para toda a vida.

Por fim, dedico um agradecimento especial a todas as fontes de inspiração que contribuíram indiretamente para este projeto. Cada autor, pesquisador e profissional cujo trabalho foi consultado desempenhou um papel significativo na construção do conhecimento apresentado neste TCC.

RESUMO

SILVEIRA, Luiz E. S. **RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO COM 40 ANOS NA REGIÃO COSTEIRA DE ARACAJU: DESAFIOS E SOLUÇÕES NA COSTA SERGIPANA**. 86p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2023.

A recuperação estrutural é um tema de bastante relevância quando se trata das estruturas de concreto armado e/ou protendidos na costa sergipana, face o efeito do clima marinho e sua agressividade são de suma importância na análise da manutenção predial. O presente trabalho busca mesclar os principais conceitos relacionados à corrosão eletroquímica das armaduras, suas causas e as soluções que foram adotadas neste estudo de caso, abordando de forma esquemática o passo a passo do processo de recuperação de estruturas comprometidas por corrosão e os desafios que essa área enfrenta nas edificações antigas e próximas ao mar. Contudo, o trabalho enfatiza a influência da incompatibilidade normativa entre as normas de concreto armado dos diferentes séculos, trazendo um alerta para essas estruturas, que além de não atenderem o cobrimento mínimo exigido na presente norma, ficam em regiões de extrema agressividade, como é o caso da cidade de Aracaju-SE.

Palavras-chave: Patologias no concreto armado; Recuperação estrutural; corrosão eletroquímica; ensaios não destrutivos; manutenção predial.

ABSTRACT

SILVEIRA, Luiz E. S. **RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO COM 40 ANOS NA REGIÃO COSTEIRA DE ARACAJU: DESAFIOS E SOLUÇÕES NA COSTA SERGIPANA**. 86p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2023.

Structural recovery is a very relevant topic when it comes to reinforced and/or prestressed concrete structures on the coast of Sergipe, given the effect of the marine climate and its aggressiveness are of paramount importance in the analysis of building maintenance. The present work seeks to merge the main concepts related to the electrochemical corrosion of reinforcement, its causes and the solutions that were adopted in this case study, schematically addressing the step-by-step process of recovering structures compromised by corrosion and the challenges that this area faces the old buildings and close to the sea. However, the work emphasizes the influence of normative incompatibility between reinforced concrete standards from different centuries, bringing a warning to these structures, which in addition to not meeting the minimum coverage required in this standard, are located in regions of extreme aggressiveness, such as the case of the city of Aracaju-SE.

Keywords: Pathologies in reinforced concrete; Structural recovery; electrochemical corrosion; non-destructive testing; building maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de corrosão de armaduras no concreto.....	21
Figura 2 – Fases dos danos causados ao concreto no período de desenvolvimento da corrosão.....	22
Figura 3 – Representação esquemática das patologias típicas observadas em vigas de concreto armado afetadas por corrosão.....	22
Figura 4 – Tipos de corrosão e fatores que provocam.....	23
Figura 5 – Espessura dos cobrimentos segundo a NB-1/60.....	24
Figura 6 – Correlação da alteração do pH com o tempo e o avanço da carbonatação	26
Figura 7 – Modos de transmissão.....	28
Figura 8 – Funcionamento de um esclerômetro.....	29
Figura 9 – Esquema de ligação dos equipamentos para o ensaio de potencial de corrosão.....	31
Figura 10 – Procedimento de recuperação estrutural de estrutura comprometida por corrosão.....	33
Figura 11 – Profundidade de corte do concreto.....	34
Figura 12 – Aplicação de primer anticorrosivo.....	35
Figura 13 – Aplicação de adesivo epóxi fluido na superfície do concreto antigo.....	36
Figura 14 – Formas para recuperação.....	36
Figura 15 – Grauteamento de um pilar.....	37
Figura 16 – Cuidados na execução de reparos.....	38

Figura 17 – Detalhe de adição de armaduras na seção transversal.....	38
Figura 18 – Emendas entre barras de armadura corroída e de complementação.....	39
Figura 19 – Ancoragem da armadura de complementação no concreto e emenda..	40
Figura 20 – Adesivo epóxi em pasta e fluído para ancoragem.....	40
Figura 21 – Solda em filetes nas armaduras emendadas por transpasse.....	40
Figura 22 – Gráfico de influência da distância em relação ao mar na concentração de cloreto na cidade de Aracaju-SE.....	44
Figura 23 – Gráfico comparativo da concentração de cloretos em relação ao mar nas cidades de Aracaju-SE e João Pessoa-PB.....	45
Figura 24 – Croqui do pavimento garagem.....	46
Figura 25 – Fluxograma do processo de recuperação estrutural.....	48
Figura 26 – Gráfico de pizza da qualidade do concreto do pavimento garagem conforme ensaio de ultrassom.....	56
Figura 27 – Disposição estrutural das vigas apoiadas em C1.....	59
Figura 28 – Disposição estrutural das vigas apoiadas em C5.....	63
Figura 29 – Disposição estrutural da laje apoiada em V1.....	68
Figura 30 – Disposição estrutural do pilar P3.....	72
Figura 31 – Disposição estrutural dos elementos no entorno da viga de sustentação da piscina.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Incidência de manifestações patológicas no concreto armado.....	18
Tabela 2 – Classificação da agressividade ambiental.....	25
Tabela 3 – Classificação dos cobrimentos nominais.....	25
Tabela 4 – Avaliação dos valores de onda ultrassônica no concreto.....	27
Tabela 5 – Interpretação dos resultados do ensaio de potencial de corrosão para o eletrodo de cobre.....	32
Tabela 6 – Procedimentos mais adequados para limpeza das superfícies de concreto e aço.....	34
Tabela 7 – VUP mínima de cada sistema.....	43
Tabela 8 – Concentração de cloretos pelo método da vela úmida na cidade de João Pessoa-PB.....	45
Tabela 9 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão na viga V1.....	51
Tabela 10 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão no console C5.....	51
Tabela 11 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão no console C1.....	52
Tabela 12 – Resultados do ensaio de ultrassom nos consoles e vigas do pavimento garagem.....	55
Tabela 13 – Resultados do ensaio de esclerometria nos elementos do pavimento garagem.....	57

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 – Extensão de V1 ensaiada.....	50
Foto 2 – Extensão de C5 ensaiada.....	51
Foto 3 – Extensão de C1 ensaiada.....	52
Foto 4 – Viga V1 após aspersão de fenolftaleína.....	53
Foto 5 – Console C5 após aspersão de fenolftaleína.....	54
Foto 6 – Console C1 antes da recuperação.....	58
Foto 7 – Escoramento da laje e vigas do playground.....	59
Foto 8 – Escarificação com martelete do console C1.....	60
Foto 9 – Estado das armaduras do console C1.....	60
Foto 10 – Suplementação das armaduras do console C1.....	61
Foto 11 – Aplicação de revestimento anticorrosivo à base de zinco nas armaduras do console C1.....	62
Foto 12 – Grauteamento do console C1.....	62
Foto 13 – Console C5 antes da recuperação.....	63
Foto 14 – Escoramento do console C5.....	64
Foto 15 – Identificação de processo de corrosão nas armaduras do console C5.....	64
Foto 16 – Identificação de processo corrosivo na extremidade do console C5.....	65
Foto 17 – Suplementação de estribos do console C5.....	65
Foto 18 – Lixamento manual das armaduras do console C5.....	66

Foto 19 – Aplicação de pintura anticorrosiva à base de zinco no console C5.....	66
Foto 20 – Grauteamento do console C5.....	67
Foto 21 – V1 antes da recuperação.....	67
Foto 22 – Escoramento da viga V1.....	68
Foto 23 – Armaduras da viga V1 expostas.....	69
Foto 24 – Armaduras após lixamento manual.....	69
Foto 25 – Pintura anticorrosiva à base zinco nas armaduras da viga V1.....	70
Foto 26 – Grauteamento da Viga V1.....	70
Foto 27 – Peça de aço exposta dentro do pilar P3.....	71
Foto 28 – Peça de aço exposta dentro do pilar P3.....	71
Foto 29 – Pilar P3 antes da recuperação.....	71
Foto 30 – Escoramento pilar P3.....	72
Foto 31 – Armadura comprometida do pilar P3.....	73
Foto 32 – Estribos do pilar P3 comprometidos.....	73
Foto 33 – Lixamento das armaduras do pilar P3.....	74
Foto 34 – Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras do pilar P3.....	74
Foto 35 – Grauteamento do pilar P3.....	75
Foto 36 – Viga de sustentação da piscina suspensa com armadura exposta em sua cabeceira.....	75

Foto 37 – Viga de sustentação da piscina suspensa com armadura exposta em sua cabeceira.....	75
Foto 38 – Rebaixo de lâmina d'água da piscina.....	76
Foto 39 – Escoramento da viga da piscina.....	77
Foto 40 – Abertura da janela de intervenção na cabeceira da viga da piscina.....	77
Foto 41 – Abertura da janela de intervenção na cabeceira da viga da piscina.....	77
Foto 42 – Suplementação das armaduras de reforço na viga da piscina.....	78
Foto 43 – Suplementação das armaduras de reforço na viga da piscina.....	78
Foto 44 – Soldagem em filetes da armadura de reforço na viga da piscina.....	79
Foto 45 – Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras da viga da piscina.....	79
Foto 46 – Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras da viga da piscina.....	80
Foto 47 – Grauteamento da cabeceira da viga da piscina.....	80
Foto 48 – Identificação de perda de seção da armadura principal do pilar P15 e da viga que o faceia.....	81
Foto 49 – Identificação de perda de seção da armadura principal do pilar P15 e da viga que o faceia.....	81
Foto 50 – Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco no pilar P15.....	82
Foto 51 – Janela de intervenção do pilar P15 preenchida com graute.....	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. Patologias nas estruturas de concreto.....	17
2.2. Corrosão eletroquímica nas armaduras.....	21
2.3. Passivação das armaduras.....	23
2.4. Carbonatação do concreto.....	25
2.5. Despassivação das armaduras.....	26
2.6. Ensaios Não destrutivos.....	27
2.7. Ensaios Semi destrutivos.....	30
2.8. Recuperação Estrutural em estruturas de concreto afetadas por corrosão.....	32
2.9. Manutenção Predial e critérios de desempenho estrutural.....	41
3. METODOLOGIA.....	44
3.1. Caracterização da edificação.....	44
3.2. Elementos estudados no processo de recuperação estrutural.....	46
3.3. Métodos empregados no processo de recuperação.....	47
3.4. Materiais e equipamentos utilizados na recuperação estrutural.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1. Resultados dos ensaios.....	50
4.2. Processo de recuperação estrutural nos elementos de concreto comprometidos por corrosão.....	58
4.2.1. Console C1.....	58
4.2.2. Console C5.....	63
4.2.3. Viga V1.....	67
4.2.4. Pilar P3.....	70
4.2.5. Viga de sustentação da piscina.....	75
4.2.6. Pilar P15.....	81
5. CONCLUSÕES.....	83
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

A deterioração das estruturas de concreto em edifícios próximos ao mar representa um desafio significativo para engenheiros e proprietários de imóveis, devido à sua exposição constante aos efeitos corrosivos da água salina e da alta presença de íons cloreto no ambiente agressivo, tornando suscetível a ocorrência de patologias, principalmente ligadas à corrosão eletroquímica das armaduras presentes no concreto armado. Segundo Nascimento (2015), a corrosão que ocorre em armaduras contidas no concreto armado é resultado das interações do material aço com o meio ambiente, acarretando reações de oxirredução.

A construção civil em qualquer região do mundo é regida por normativas com embasamento técnico científico que dizem respeito às boas práticas com relação aos métodos empregados em cada setor dentro desse ramo, tornando a execução dos empreendimentos humanos mais segura e durável. Entretanto, essas técnicas contidas nas normas estão sujeitas às mudanças tecnológicas e científicas ao decorrer dos anos, aprimorando cada vez mais o desenvolvimento da engenharia. Sabendo disso, é necessário que em edificações antigas seja feito um estudo das incompatibilidades das normas construtivas nas diferentes épocas, principalmente em regiões costeiras, onde as normas mais antigas não abordavam de forma precisa e sustentável a agressividade ambiental. A falta de mapeamento da agressividade ambiental nesses ambientes agrava o contexto face o desconhecimento das concentrações dos agentes agressivos cloretos, dióxido de carbono e sulfatos externos.

Para Souza e Ripper (1988), patologia das construções é a área de estudo da engenharia que tem como foco diagnosticar as causas, origens e impactos. Com isso, neste estudo de caso serão abordadas as principais patologias, estudo das suas causas e as soluções adotadas na obra de recuperação estrutural executada em um edifício multipavimentos em concreto armado com 40 anos de existência, situado em na região costeira de Aracaju, que ao longo dos anos tem sofrido os efeitos do clima marinho, resultando em danos estruturais e infiltrações que

provocaram, principalmente, corrosão nas armaduras dos elementos de concreto armado.

Neste contexto, serão exploradas as principais etapas que englobam a análise dessas patologias presentes no edifício, desde suas causas até suas consequências e, posteriormente, a reabilitação e recuperação, destacando as técnicas utilizadas, os desafios encontrados e os resultados obtidos, com o objetivo de oferecer uma visão abrangente das soluções empregadas para prolongar a vida útil e garantir a segurança do edifício.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Patologia nas estruturas de concreto

Patologia é um termo presente na literatura em várias áreas do conhecimento, sendo comumente utilizada na medicina para referir-se ao estudo das doenças, pois essa ciência tem por objetivo investigar as causas, sintomas e impactos das mesmas (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE, 2019).

Apesar da ciência das patologias ser comumente utilizada na medicina, isso não significa que ela não abrange outras áreas. Sabendo disso, o estudo das patologias das construções vem com o mesmo objetivo encontrado na medicina, que é de investigar, procurar causas e soluções para uma determinada doença, que no caso das construções são as problemáticas encontradas nas edificações que os profissionais de engenharia intitulam como “doenças das edificações”.

2.1.1 Principais Causas das Patologias nas edificações:

Para Oliveira (2013), as patologias nas construções apresentam suas origens nas principais etapas da construção civil, que são: O planejamento, projetos, materiais e execução; uma simples falha em alguns desses processos deixa a edificação propícia a desenvolver patologias ao longo do tempo. Sabendo disso, as principais causas das patologias identificadas em boa parte dos empreendimentos são:

- Erros de Projeto: Falhas no projeto estrutural, como cálculos inadequados de cargas, má concepção estrutural; erros nos projetos hidrossanitários; e de instalações elétricas.
- Materiais de baixa qualidade: A escolha de materiais inadequados ou de baixa qualidade pode resultar em deterioração prematura de elementos que compõem o sistema construtivo.
- Problemas de Execução: Falhas na construção, como má compactação do solo, falta de aderência entre os componentes ou impermeabilização

inadequada; erros na execução da estrutura, por exemplo, podem causar problemas na edificação.

- **Ação do Ambiente:** Fatores ambientais como umidade, agentes agressivos, variações de temperatura e ventos fortes podem contribuir para o surgimento de patologias. A falta de mapeamento da agressividade ambiental no microclima contribui para o aumento na degradação dos componentes estruturais, face ao ataque superficial do seu microclima localizado.

2.1.2 Tipos de patologias mais comuns em estruturas de concreto

Helene e Pereira (2007), enfatizam que os problemas mais comuns em estruturas de concreto armado são eflorescências, fissuras, flechas demasiadas, corrosão das armaduras, manchas no concreto e problemas de homogeneidade do concreto, devido ao mau adensamento. Já Machado (2002), faz um estudo relacionando à incidência dos tipos de patologias em estruturas de concreto armado de acordo com a tabela 1:

Tabela 1: Incidência de manifestações patológicas no concreto armado.

Manifestações Patológicas	Ocorrência (Percentual)
Deterioração e degradação química da construção	7%
Deformações (flechas e rotações) excessivas	10%
Segregação dos materiais componentes do concreto	20%
Corrosão das armaduras do concreto armado	20%
Fissuras e trincas ativas ou passivas nas peças de concreto armado	21%
Manchas na superfície do concreto armado	22%

Fonte: Machado (2002).

2.1.3 Métodos de diagnóstico

O diagnóstico de manifestações patológicas nem sempre é feito apenas por inspeção visual, em alguns casos é necessário que sejam feitos ensaios destrutivos e/ou não destrutivos, para um diagnóstico mais certo (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE, 2019). Para tanto, é comumente seguido pelos profissionais da Engenharia Diagnóstica os seguintes passos:

- Inspeção Visual: Observação direta para identificar defeitos visíveis;
- Ensaios Não Destrutivos: Inclui ensaios de ultrassom, esclerometria e termografia para detectar problemas ocultos;
- Amostragem e Análise de Materiais (Ensaios destrutivos): Análise laboratorial de amostras de materiais de construção para determinar sua qualidade e estado;
- Modelagem Computacional: Uso de software de modelagem para simular o comportamento estrutural e identificar possíveis problemas.

2.1.4 Consequências e riscos das patologias

A persistência das patologias em estruturas podem trazer desconforto e riscos aos moradores de uma edificação, as consequências das patologias se não tratadas podem ser catastróficas e prejudiciais. Com isso, algumas das principais consequências das patologias em edificações são:

- Risco à Segurança: Patologias podem colocar a vida das pessoas que residem nas edificações em perigo.
- Desvalorização do Imóvel: Problemas estruturais reduzem o valor de mercado dos imóveis, pois diminui a confiabilidade das pessoas quanto à segurança da edificação.
- Custos de Reparo: As correções podem ser dispendiosas e demoradas, e com a piora do estado da edificação, cada vez mais a manutenção da mesma irá sofrer reajustes, resultando em custos ainda mais elevados de manutenção.

2.1.5 Prevenção e reparo

A prevenção é a primeira linha de defesa contra problemas estruturais nas edificações. Consiste em tomar medidas proativas para evitar a deterioração

prematura das estruturas. Apesar de todas as medidas preventivas, as construções podem eventualmente precisar de reparos devido ao envelhecimento, ao desgaste natural ou a eventos extremos. A realização de reparos nas estruturas é crucial para garantir a segurança e o funcionamento adequado do edifício.

Para a prevenção de problemas contra o surgimento de manifestações patológicas nas estruturas é comum que seja realizado o que orienta a NBR 5674:2012:

- Inspeções regulares: É essencial que engenheiros estruturais realizem inspeções periódicas. Essas inspeções ajudam a identificar problemas em estágios iniciais, permitindo que sejam tomadas medidas corretivas antes que eles se tornem críticos.
- Manutenção programada e preventiva: Implementar um plano de manutenção regular, incluindo limpeza, impermeabilizações e substituição de componentes desgastados, auxiliam na extensão da vida útil da estrutura.

Já em casos de reparo nas estruturas, Souza e Ripper (1998) enfatizam alguns tópicos necessários no estudo de recuperação das estruturas de concreto armado:

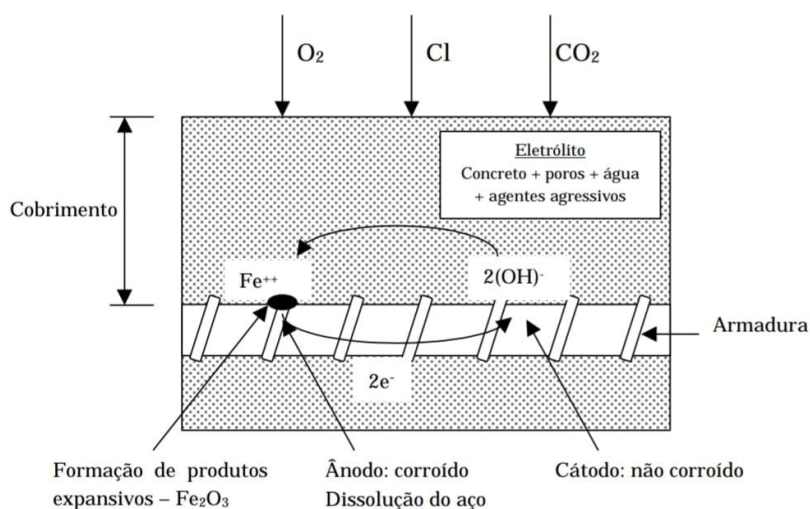
- Reforço estrutural: Quando uma estrutura já existente não atende mais às demandas de carga, pode ser necessário realizar um reforço na estrutura. Isso implica em adicionar elementos, como vigas ou pilares, para aumentar sua capacidade portante.
- Reparo do concreto: O concreto é um material comum em estruturas de edifícios, e rachaduras ou deterioração podem ocorrer ao longo do tempo. O reparo de concreto envolve a aplicação de materiais específicos para restaurar a integridade estrutural.
- Reparo das armaduras: armaduras de aço podem sofrer corrosão e danos ao longo do tempo. O reparo do aço geralmente envolve a limpeza, o tratamento e a pintura para evitar futura corrosão.

2.2 Corrosão eletroquímica nas armaduras

A deterioração eletroquímica das armaduras do concreto é um processo de desgaste que ocorre quando o aço usado como reforço nas estruturas de concreto começa a ser corroído por causa da interação com o ambiente agressivo. Esse fenômeno é um desafio comum em infraestruturas, como pontes, prédios e estruturas de contenção, podendo comprometer a resistência das construções e resultar em falhas catastróficas, caso não seja identificado e tratado.

O processo de corrosão em armaduras no concreto armado pode ser explicado sucintamente com o auxílio do mecanismo eletroquímico ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Modelo de corrosão de armaduras no concreto.



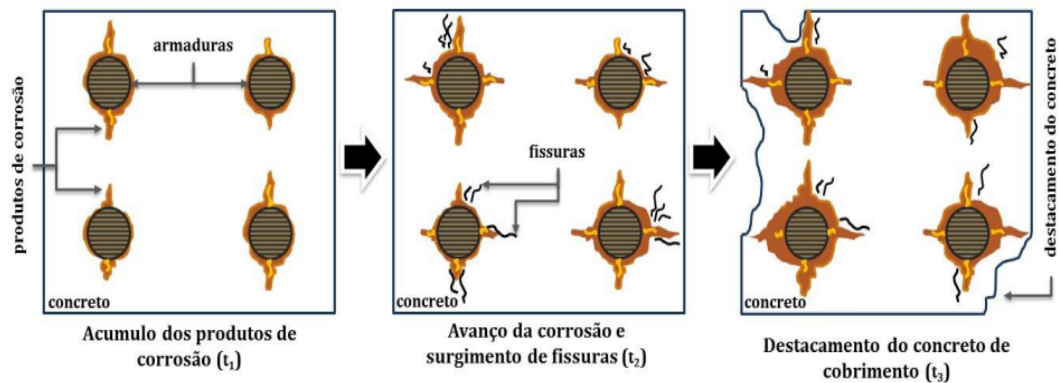
Fonte: Andrade (2001).

Nas regiões anódicas, ocorre a degradação do metal, resultando na liberação de íons Fe^{++} para a solução, acompanhada da liberação de elétrons. Esses elétrons gerados movem-se do metal em direção às áreas catódicas, onde se combinam com o oxigênio dissolvido na solução, promovendo assim a geração de íons hidroxila OH^- . Após isso, os íons hidroxila interagem com os íons Fe^{2+} , resultando na formação do hidróxido metálico ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), que se deposita na superfície do metal (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE, 2019). No entanto, o hidróxido metálico é instável

e, na presença de água e oxigênio, sofre oxidação, transformando-se em $\text{Fe}(\text{OH})_3$. O composto mencionado, representado como $\text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O}$, é conhecido como a ferrugem comum (PANNONI, 2015).

A cada nova reação de oxirredução, o produto formado nesta reação vai se tornando cada vez mais volumoso conforme a Figura 2.

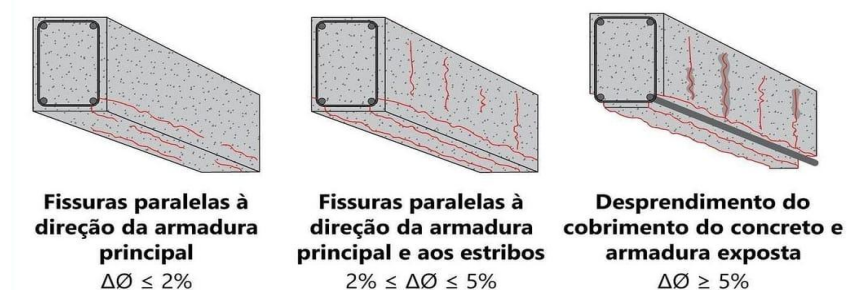
.Figura 2. Fases dos danos causados ao concreto no período de desenvolvimento da corrosão.



Fonte: Felix, Balabuch, Posterlli e Carrazedo (2018).

Com isso, um dos principais indicativos visíveis de corrosão nas armaduras do concreto armado são as fissuras, manchas marrom avermelhadas e o deslocamento do concreto. Além disso, o grau de fissuração nesses casos está diretamente associado ao avanço volumétrico da corrosão, conforme o esquema da Figura 3.

Figura 3. Representação esquemática das patologias típicas observadas em vigas de concreto armado afetadas por corrosão.

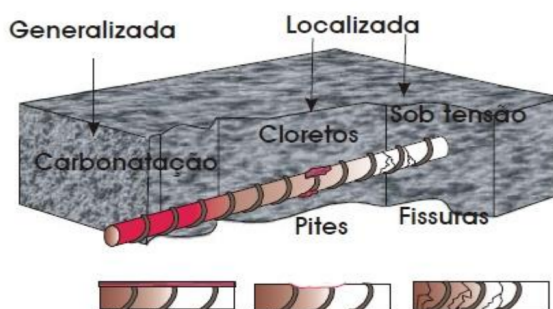


Fonte: Husni *et al.* (2003).

Na figura 3 é apresentada a relação entre a variação do diâmetro de uma barra em corrosão e a manifestação das fissuras no concreto em seu entorno. Ainda segundo Husni *et al.* (2003), é interessante observar que para variações de diâmetro acima de 5%, o concreto deslaca e as barras ficam à mostra.

Segundo Cascudo (1997), o processo de corrosão nas armaduras do concreto armado pode ser dividido em três tipos, a corrosão por carbonatação, que geralmente apresenta-se de forma generalizada; a corrosão por ataque de cloretos, que apresenta pontos de corrosão ou corrosão localizada; e corrosão sob tensão.

Figura 4: Tipos de corrosão e fatores que provocam.



Fonte: Cascudo (1997).

2.3 Passivação das armaduras

A passivação das armaduras é um processo de proteção das mesmas contra o mecanismo de corrosão apresentado em 2.2, esse processo é constituído pela presença de óxidos aderentes e insolúveis, que formam uma barreira contra o avanço da corrosão (GENTIL, 1996). O cobrimento de concreto presente nas estruturas é fundamental para garantir a proteção das armaduras contra o processo de corrosão, visto que a elevada alcalinidade do concreto favorece a formação e permanência da camada passivadora do aço dentro do concreto. Essa elevada alcalinidade é formada principalmente durante o processo de hidratação do cimento, onde há a formação da portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ (CARMONA, 2005).

A espessura de cobrimento do concreto exigida por norma no Brasil sofreu alterações durante o passar dos anos, principalmente na virada de séculos, onde a norma predominante nos projetos de concreto armado do século passado foi a

NB-1/60 de 1960. Na figura 5 é especificada a espessura necessária de cobrimento nas estruturas de concreto armado dependendo do seu local segundo a norma NB-1/60.

Figura 5: Espessura dos cobrimentos segundo a NB-1/60.

C — PROTEÇÃO DA ARMADURA	
Cobrimento	
41. Todas as barras da armadura, principal ou não, devem ter cobrimento de concreto nunca menor que:	
em lajes e paredes no interior de edifícios	1 cm
em lajes e paredes ao ar livre	1,5 cm
em vigas, pilares e arcos no interior de edifícios	1,5 cm
em vigas, pilares e arcos ao ar livre ..	2 cm
em peças em contato com o solo	2 cm
Neste último caso exige-se, junto à armadura calculada para resistir a esforços de tração, se o solo não fôr rochoso, a interposição de uma camada de concreto simples, não computada no cálculo, com espessura mínima de 5 cm.	
Em lajes no interior de edifícios, permite-se que 0,5 cm do cobrimento exigido seja feito com embôço.	

Fonte: NB-1/60.

Fica evidente que a NB-1/60 não faz abordagens precisas quanto à agressividade ambiental quando se trata de proteção das armaduras, a norma apenas difere as posições internas, externas e com contato ao solo dos elementos estruturais, sem levar em consideração a região na qual o empreendimento será construído.

Quando se trata das atuais normas sobre os projetos de estruturas de concreto armado, é percebida a falta de compatibilidade entre essas normas no que diz respeito à proteção das armaduras. A NBR 6118 (ABNT, 2023) faz uma abordagem mais detalhada das regiões nas quais os empreendimentos serão construídos, diferenciando com classes de agressividade, que variam de I a IV, conforme a tabela 2.

Tabela 2. Classificação da agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023).

Além disso, a NBR 6118 (ABNT, 2023) faz a abordagem da escolha das espessuras de cobrimento de forma que atenda o especificado na tabela 2, separando a espessura necessária para cada região onde a edificação será construída conforme tabela 3.

Tabela 3. Classificação dos cobrimentos nominais.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		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

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023).

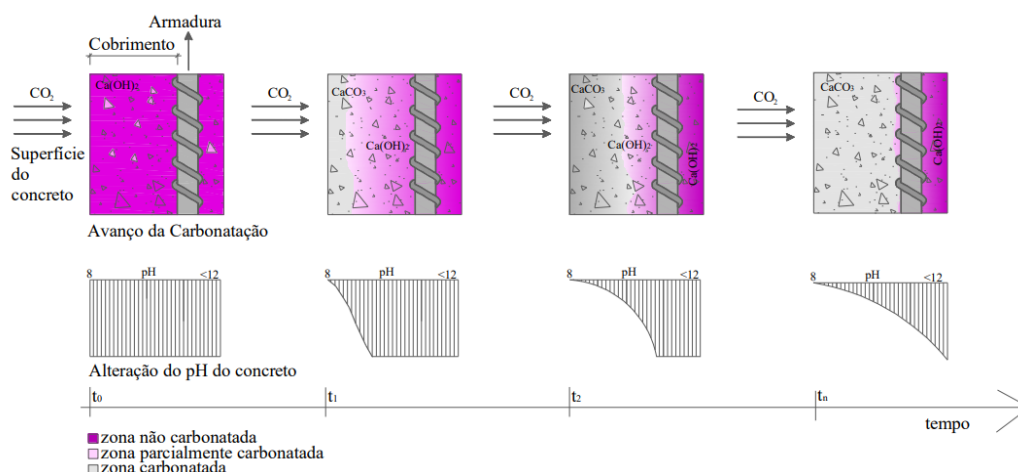
2.4 Carbonatação do concreto

A carbonatação do concreto é um processo químico no qual o dióxido de carbono (CO₂) encontrado no ar reage com os componentes alcalinos presentes no concreto. Essa reação química resulta na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃), que é uma substância sólida e insolúvel. Na equação 01 é evidenciado essa reação.



Os principais elementos do concreto afetados por esse processo são o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e os silicatos de cálcio presentes na matriz do cimento. Com o avanço do processo de carbonatação, cada vez mais o concreto perde sua função de passivar as armaduras, pois seu pH é reduzido tornando-as suscetíveis ao ataque de agentes agressivos conforme a figura 6.

Figura 6: Correlação da alteração do pH com o tempo e o avanço da carbonatação.



Fonte: Possan (2010).

2.5 Despassivação das armaduras

A despassivação das armaduras é um fenômeno que ocorre no aço presente nos elementos de concreto, onde há a perda da camada protetora de óxidos devido ao ataque de algum agente externo agressivo, ocasionando a deterioração das armaduras (CARMONA, 2005). Esse fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, sendo eles a carbonatação do concreto, o ataque de cloreto por águas salinas, fissuras e defeitos nas estruturas facilitando a penetração de agentes agressivos (ANDRADE, 1992).

O processo de despassivação das armaduras pode ser muito prejudicial para as estruturas, pois quando as armaduras perdem a camada de proteção e começam a corroer, elas se expandem, o que pode resultar em rachaduras e danos no concreto ao redor. A corrosão das armaduras é um processo auto sustentável que pode causar uma significativa diminuição nas seções transversais das barras de aço, enfraquecendo a estrutura. Isso pode comprometer a integridade e a segurança da construção.

2.6 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (ENDs) desempenham um papel essencial na área da engenharia diagnóstica, fornecendo uma variedade abrangente de técnicas que permitem avaliar a integridade e a qualidade dos materiais, dos componentes e das estruturas sem causar danos físicos permanentes (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE; 2019). Essas técnicas são extremamente importantes em vários campos da engenharia, como aeroespacial, civil, mecânica, elétrica e nuclear. A seguir, são detalhados os ensaios de ultrassom, pacometria e a esclerometria, que, junto com a inspeção visual, são os ensaios não destrutivos mais utilizados no concreto armado.

- Ultrassom

O ensaio de ultrassom é utilizado em diversas áreas profissionais, tanto na área da saúde, onde é comumente associado, quanto na área da engenharia diagnóstica, sendo regido pela NBR 16616 (ABNT, 2017). A principal função associada ao ensaio de ultrassom é o estudo da qualidade e da homogeneidade do concreto, visto que a partir da medição da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, medidas entre os transdutores, é possível obter informações quanto à existência de eventuais falhas de concretagem, fissuras e suas respectivas profundidades, além de ser possível classificar zonas de alta e baixa qualidade do concreto (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE; 2019). A tabela 4 apresenta as classificações do concreto, quanto à qualidade, em função das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas.

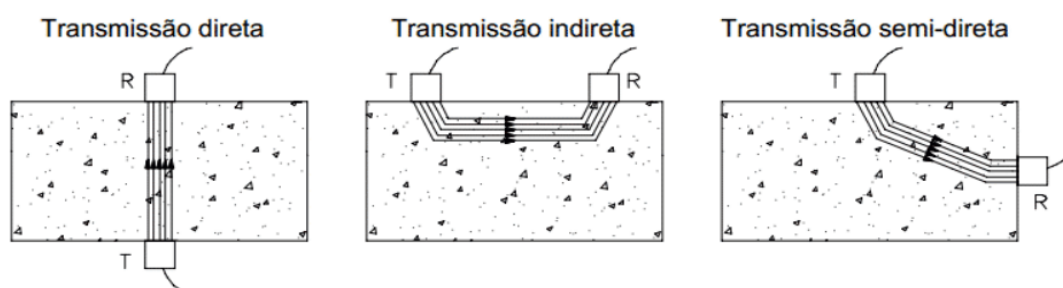
Tabela 4: Avaliação dos valores de onda ultrassônica no concreto.

Velocidade de propagação da onda (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Bom
$3000 < V < 3500$	Regular
$2000 < V < 3000$	Ruim
$V < 2000$	Péssimo

Fonte: Adaptado - Whitehurst (1951).

Ainda segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019), o ensaio de ultrassom pode ser realizado de três formas: direta, indireta e semidireta (figura 7), dependendo da limitação do acesso à superfície de concreto, sendo previamente configurado o equipamento para o tipo de transmissão, e os transdutores selecionados de acordo com o tipo de material.

Figura 7: Modos de transmissão.



Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2019).

Esse ensaio é corriqueiramente requisitado na perícia de estruturas de concreto armado, graças a sua eficiência em classificar a qualidade do concreto. Entretanto, segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), alguns fatores podem atrapalhar o ensaio de ultrassom, como um alto teor de agregado graúdo e uma alta densidade de armaduras no elemento estrutural.

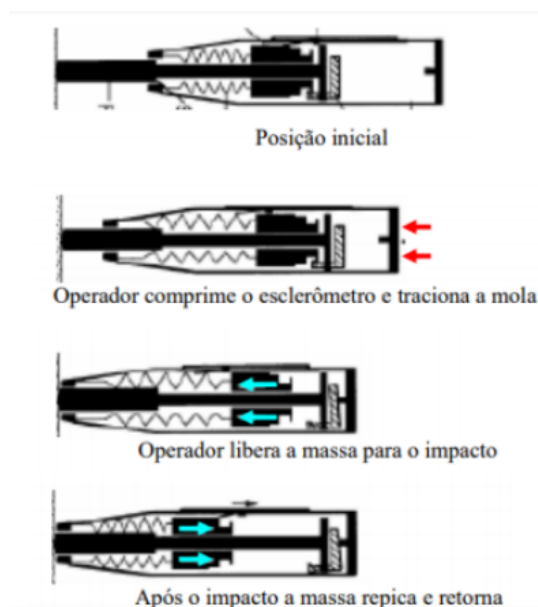
- Pacometria

O ensaio de pacometria é um dos pré-requisitos para a realização do ensaio de ultrassom, visto que com o pacômetro é possível localizar as armaduras do elemento estrutural. O pacômetro funciona como um detector eletromagnético de elementos metálicos, pois a partir da emissão de um campo eletromagnético, há uma interação entre a frequência do campo e o metal presente nas armaduras, tornando possível a identificação e a localização aproximada das barras dentro da peça de concreto armado. Além da localização das armaduras, alguns modelos de pacômetros também possibilitam estimar o cobrimento das armaduras e o diâmetro delas.

- Esclerometria

O ensaio de esclerometria é baseado na medição da dureza superficial do concreto. O martelo de Schmidt utilizado no ensaio é pressionado contra a superfície do concreto e solta, assim a energia cinética liberada no impacto é parcialmente absorvida pelo concreto e parcialmente refletida de volta para o martelo. O valor da dureza é estimado medindo-se a fração de energia refletida. Quanto mais duro o concreto, maior será a fração da energia refletida.

Figura 8: Funcionamento de um esclerômetro.



Fonte: Escobar et al. (2008).

Apesar da principal função do ensaio ser a medição da dureza superficial do concreto, alguns profissionais da Engenharia Diagnóstica o usam para fazer uma estimativa da resistência característica do concreto, que embora seja possível fazer essa estimativa através da curva de correlação presente no próprio aparelho, não é recomendada, visto que a curva de correlação presente no equipamento foi criada baseada em concretos desconhecidos e muito provavelmente não compatíveis com a realidade dos concretos da região onde será feito o ensaio (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE; 2019).

2.7 Ensaios Semi Destrutivos

Os ensaios semi destrutivos, diferente dos ensaios não destrutivos, promovem alguma degradação no elemento de concreto estudado, com a finalidade de garantir uma boa eficiência dos ensaios. Entre os ensaios semi destrutivos mais utilizados, está o ensaio de profundidade de carbonatação, presença de cloretos e potencial de corrosão.

- Profundidade de carbonatação.

O ensaio de profundidade de carbonatação é um ensaio bastante requisitado em perícias realizadas nas estruturas de concreto armado, visto que a sua principal função é determinar a profundidade de penetração de dióxido de carbono(CO_2) no concreto. O CO_2 reage com os componentes alcalinos do concreto, como o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio, esse processo por sua vez compromete a integridade do concreto, pois reduz o seu pH, tornando as armaduras mais vulneráveis.

Sabendo disso, o ensaio baseia-se na remoção de uma camada do concreto para que seja feita a aspersão de substância indicadora de fenolftaleína ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$). A fenolftaleína é um indicador que muda de cor em resposta ao valor de pH do meio. Ao ser diluída em álcool etílico e borrifado em meio básico, a substância apresenta coloração rosa, mas quando aplicada em meio ácido a substância não apresenta coloração alguma (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE; 2019).

- Presença de íons cloreto.

O ensaio realizado para identificar a presença de íons cloreto no concreto é de suma importância na análise de uma estrutura comprometida, principalmente em regiões costeiras, onde há uma grande presença de íons cloreto no ambiente.

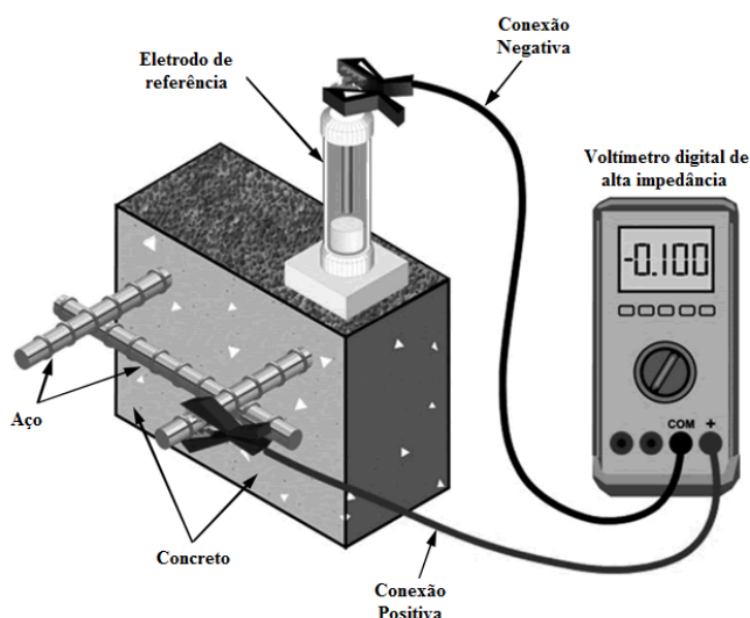
O ensaio baseia-se na remoção de uma camada do concreto para que seja feita a aspersão de nitrato de prata (AgNO_3), essa substância após reagir com os íons cloreto presentes no concreto será notada uma região esbranquiçada, onde haverá a precipitação de AgCl , evidenciando a presença de íons cloreto no concreto.

Já nas regiões que apresentarem coloração amarronzada, não há a presença de íons cloreto (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE; 2019).

- Potencial de corrosão.

O ensaio de potencial de corrosão é comumente requisitado para a análise de estruturas que apresentem manifestações patológicas típicas do processo de corrosão, sua finalidade é avaliar a probabilidade de corrosão das armaduras nos elementos de concreto sem destruí-los. O esquema básico para a realização do ensaio é ilustrado na figura 9.

Figura 9: Esquema de ligação dos equipamentos para o ensaio de potencial de corrosão.



Fonte: Moresi e Bellaguarda (2016).

O ensaio é realizado conforme a ASTM C - 876:2009, utilizando um voltímetro de alta impedância aterrado à armadura previamente exposta da peça de concreto armado e de um eletrodo de referência em contato com a superfície de concreto, que geralmente é de cobre. Além disso, é importante que a superfície esteja previamente saturada, a fim de garantir a formação de um eletrólito no meio ensaiado, ou seja garantir que o contato elétrico se estabelece. A partir dessa diferença de potencial é gerado um circuito fechado onde é possível medir o potencial do circuito através do voltímetro, desse modo os valores de potenciais obtidos darão uma probabilidade de corrosão das armaduras (SHELMAN, FERNANDES, COSTA e SILVA; 2017). Antes da

realização do ensaio é imprescindível que sejam localizadas as armaduras com o ensaio de pacometria, para que o eletrodo seja posicionado na região correta. Além disso, é importante que a superfície esteja limpa, para garantir o bom funcionamento do equipamento e resultados confiáveis.

Os resultados de potencial de corrosão podem ser interpretados a partir das classificações feitas pela ASTM C - 876:2009, conforme tabela 5.

Tabela 5: Interpretação dos resultados do ensaio de potencial de corrosão para o eletrodo de cobre.

Potenciais de corrosão	Probabilidade de ter corrosão
Mais positivos que -200mV	Menor que 10%
Entre -200mV e -350mV	Atividade de corrosão incerta
Mais negativos que -350mV	Maior que 90%

Fonte: Adaptado - ASTM C - 876:2009.

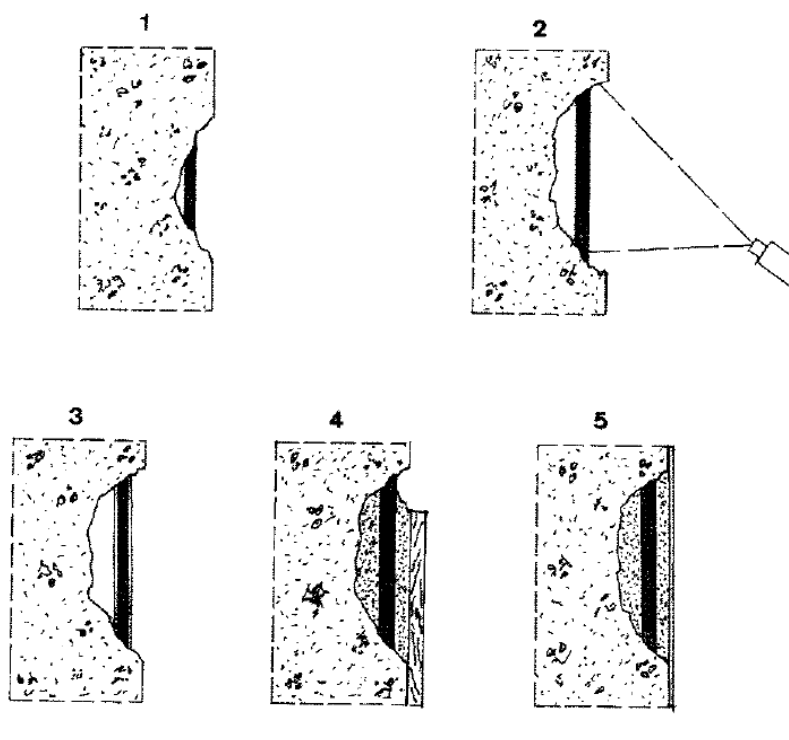
2.8 Recuperação Estrutural em estruturas de concreto afetadas por corrosão

A recuperação estrutural em estruturas de concreto armado é um procedimento crucial para restabelecer a capacidade de suporte, durabilidade e segurança de edifícios e outras infraestruturas que tenham sofrido danos ao longo do tempo, principalmente devido a fatores como condições ambientais adversas, sobrecarga ou falhas no projeto (SOUZA e RIPPER, 1998).

A corrosão das armaduras em elementos de concreto é uma das principais causas da deterioração das estruturas, visto que a corrosão em níveis mais avançados compromete a seção das barras de aço. Além disso, é sabido que as barras de aço presentes dentro dos elementos de concreto contribuem com a sua resistência, principalmente em regiões de tração, onde o concreto não resiste com eficiência. Sabendo disso, em caso de identificação de corrosão é necessário que seja feito seu tratamento..

O processo de recuperação da armadura comprometida por corrosão segue os seguintes passos da figura 10:

Figura 10: Procedimento de recuperação estrutural de estrutura comprometida por corrosão.



Fonte: Rodríguez (2003).

(1) Limpeza e identificação da armadura corroída: Nesse processo é feita a identificação das regiões afetadas por corrosão, muitas das vezes não é possível a identificação de forma visual, tornando necessário a realização de ensaios para a sua devida identificação (RODRÍGUEZ, 2003). Além disso, após a identificação, deve ser feito um estudo sobre a necessidade de escoramento na região que será recuperada (SOUZA e RIPPER, 1998).

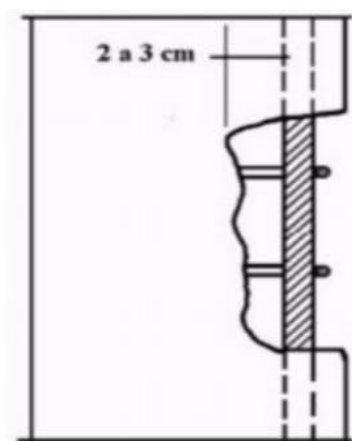
(2) Abertura e limpeza de superfície a ser tratada: Helene (1992) classifica que o tipo de abertura e limpeza da superfície de concreto e aço que devem ser adotados, conforme tabela 6.

Tabela 6: Procedimentos mais adequados para limpeza das superfícies de concreto e aço.

Procedimento	Procedimento mais adequado para			
	Concreto com superfície		Aço com superfície	
	Seca	Úmida	Seca	Úmida
Escarificação manual	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Escarificação mecânica	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Lixamento manual	inadequado	aceitável	adequado	aceitável
Lixamento elétrico	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Escovamento manual	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Jato de areia seco ou úmido	adequado	adequado	adequado	aceitável

Fonte: Helene (1992).

Além disso, Souza e Ripper (1998) recomendam que a profundidade de corte do concreto no processo de recuperação seja de 2 a 3 cm além da armadura.

Figura 11: Profundidade de corte do concreto.

Fonte: Souza e Ripper (1998).

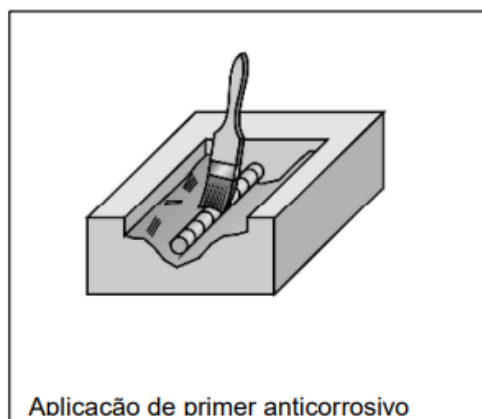
(3) Proteção e tratamento da armadura: Após o processo descrito em (2), é feito o tratamento das armaduras, que pode ser executado por meio de diversos métodos. Segundo Gentil (1996), o tratamento das armaduras deterioradas por

corrosão pode ser feito utilizando proteção catódica, revestimentos protetores e inibidores de corrosão.

Na proteção catódica, coloca-se um conjunto de ânodos de sacrifício próximos às barras de aço no concreto. Por meio de um sistema de controle, estabelece-se uma corrente elétrica entre os ânodos e as barras, criando um ambiente em que as barras se tornam catódicas, evitando assim a corrosão (GENTIL, 1996). Já os inibidores de corrosão são aditivos colocados no concreto, a fim de retardar a ação dos cloretos e consequente despassivação das armaduras, sendo um dos mais utilizados o nitrito de sódio e de cálcio (GENTIL, 1996).

A solução mais requisitada e com maior facilidade de execução é a aplicação de revestimentos protetores (figura 12), sendo que nos casos de reparos de armaduras corroídas, os mais utilizados são os anticorrosivos à base de zinco, que tem como procedimento a aplicação sobre a superfície da armadura, garantindo a proteção antioxidante da barra de aço. Essa pintura funciona como um anôdo de sacrifício, proporcionando a durabilidade do aço (CASCUDO, 1997).

Figura 12: Aplicação de primer anticorrosivo.



Fonte: Granato (2002).

(4) e (5) Regeneração da camada de concreto: Para o processo de regeneração da camada de concreto é importante que seja aplicado um adesivo estrutural sobre a superfície a ser preenchida. Esse adesivo irá garantir a integridade entre os diferentes materiais (GRANATO, 2002), podendo ser adesivo epóxi (figura 13) ou outros adesivos estruturais.

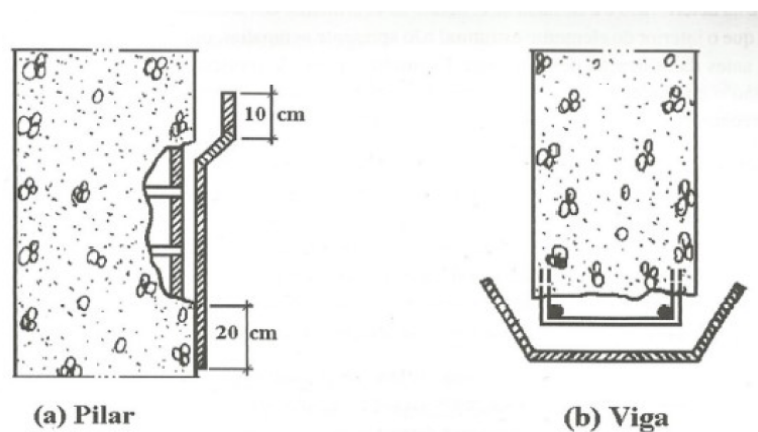
Figura 13: Aplicação de adesivo epóxi fluido na superfície do concreto antigo.



Fonte: Quartzolit (2023).

Após a aplicação do adesivo estrutural, é feito o complemento da janela de intervenção, que é comumente feito com graute. Para a sua utilização é necessário que seja elaborada uma fôrma devido a sua consistência fluída (RAMALHO e CORRÊA, 2003), conforme figura 14.

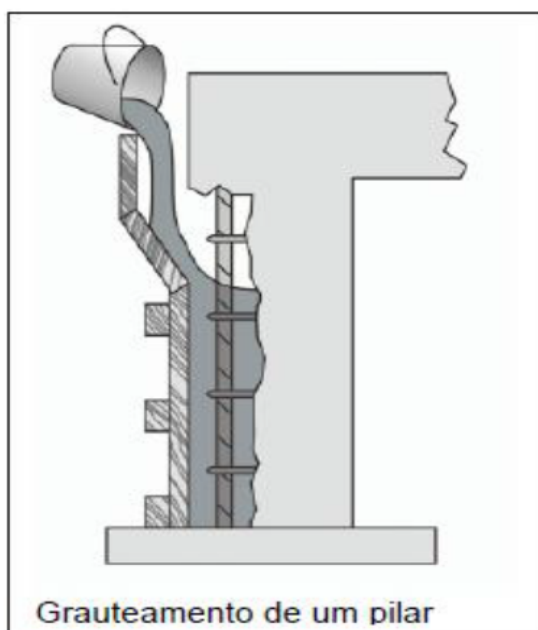
Figura 14: Formas para recuperação.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

O processo de grauteamento de qualquer elemento de concreto armado segue o procedimento descrito na figura 15.

Figura 15: Grauteamento de um pilar.

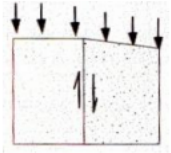
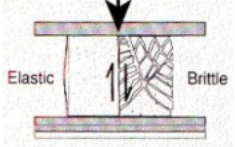
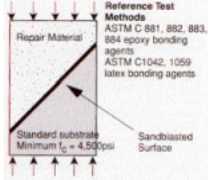
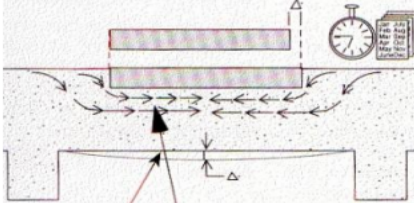


Fonte: Granato (2002).

Apesar do graute ser o mais utilizado nas obras de recuperação estrutural, existem outros métodos que podem ser empregados, como as argamassas epóxicas ou poliméricas e os concretos convencionais, sendo que as argamassas só podem ser adotadas como material de recuperação em reparos que apenas o recobrimento da armadura esteja deteriorado (SOUZA e RIPPER, 1998).

Com base nesses procedimentos, é necessário que seja feito o processo de recuperação com bastante cuidado, visto que a camada recuperada irá suportar um percentual das cargas da estrutura (GRANATO, 2002). Ainda, segundo esse autor, algumas medidas devem ser adotadas no processo para garantir a qualidade da execução conforme figura 16.

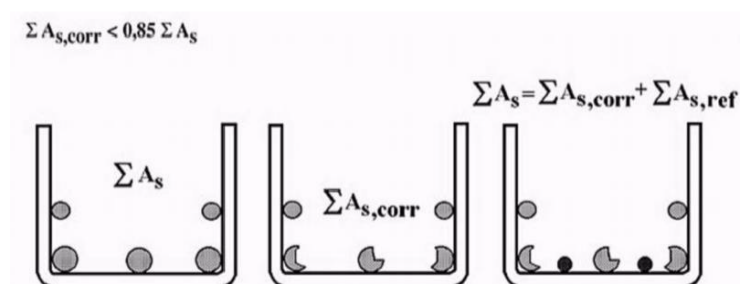
Figura 16: Cuidados na execução de reparos.

	⇒ Utilizar materiais com o módulo de elasticidade semelhante ao da estrutura, e de materiais que não sofram deformações que impeçam que os mesmos suportem parte das cargas que lhe são atribuídas.
	
	⇒ Utilizar materiais com coeficiente de expansão térmica semelhante ao da estrutura, de forma a não tensões na linha de aderência.
	⇒ Garantir a boa aderência do material de reparo à estrutura, de forma a que se comportem como uma peça única.
	⇒ É esperada uma certa retração do material de reparo. Isto pode fazer com que o reparo não contribua para suportar as cargas impostas. Devem-se adotar todos os procedimentos possíveis para minimizar a retração do reparo, tal como traço do material de reparo, retração compensada, cura, etc.

Fonte: Granato (2002).

Além disso, quando a seção das armaduras está comprometida pela ação da corrosão, é necessário que seja avaliada a necessidade de suplementação das armaduras. O reforço por adição de armaduras suplementares é um dos mais utilizados em casos de corrosão das armaduras, visto que o processo de corrosão pode prejudicar a seção transversal do aço. Sabendo disso, Souza e Ripper (1998) abordam a seguinte técnica para recomposição da área de aço (figura 17).

Figura 17: Detalhe de adição de armaduras na seção transversal.

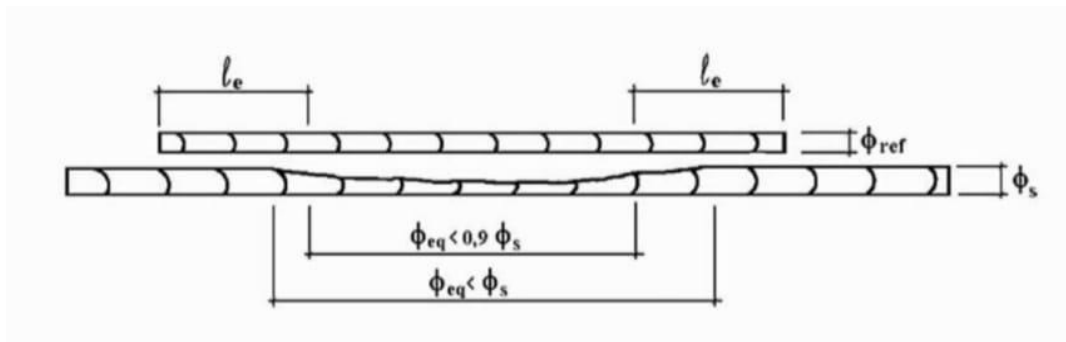


Fonte: Souza e Ripper (1998).

Souza e Ripper (1998) recomendam a adição de armaduras suplementares em casos de que haja uma perda de 15% da seção das armaduras, devido ao comprometimento do processo de corrosão. Além disso, segundo os autores as armaduras suplementares devem ser previstas com seções, que quando somadas com as armaduras já existentes seja igual a área de aço prevista para o elemento estrutural. Contudo, é sabido que a adição de armaduras excedentes a essa equação não compromete a ideia de reforço da área de aço, contanto que seja mantido o limite de ductilidade do domínio 3 para concreto armado.

Ainda segundo Souza e Ripper (1998), o tamanho da emenda de armaduras de suplementação em armaduras deterioradas por corrosão na seção longitudinal deve admitir duas hipóteses ilustradas na figura 18, sendo, a primeira, considerando que a armadura de complementação cubra a extensão de 90% do trecho corroído, e a segunda que a mesma cubra toda a extensão do trecho corroído. Entretanto, na prática, é mais utilizada a segunda hipótese, ou seja que a emenda comece e termine apenas no trecho são, cobrindo totalmente o trecho comprometido.

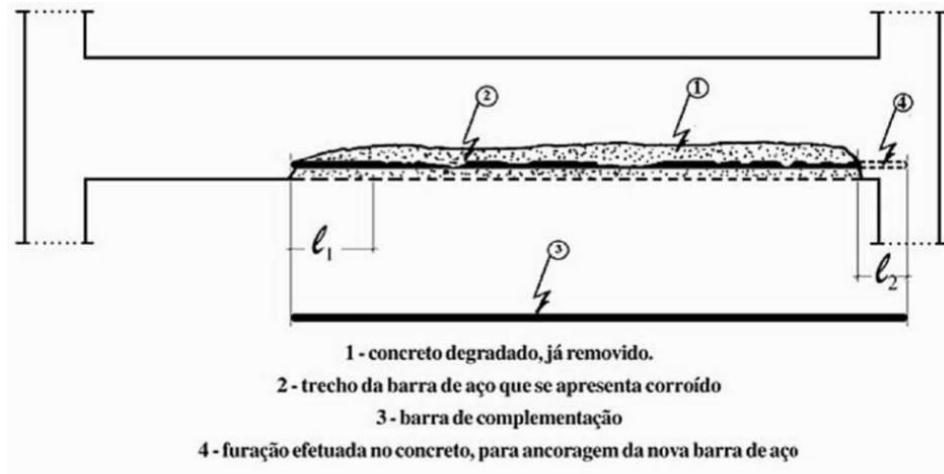
Figura 18: Emendas entre barras de armadura corroída e de complementação.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

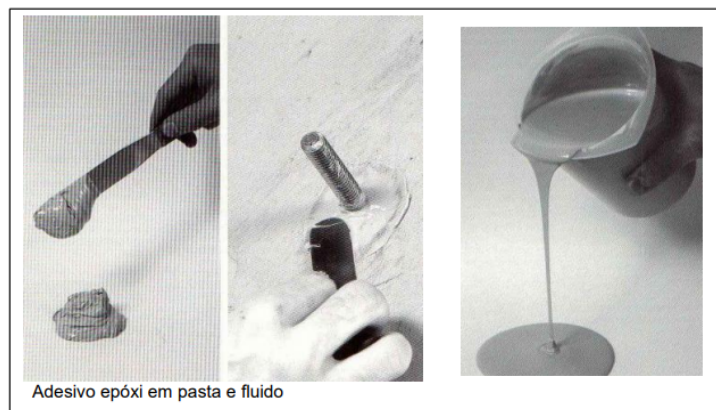
Essa emenda pode ser feita por transpasse das armaduras ou por solda, sendo que para ser feita a solda, o tipo de aço deve admitir soldagem (SOUZA e RIPPER, 1998). Ainda segundo o autor, em casos de que é necessário a furação do concreto para ancoragem das armaduras de complementação, estas devem ser imersas com epóxi ou grout, conforme figura 19 e 20.

Figura 19: Ancoragem da armadura de complementação no concreto e emenda.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Figura 20: Adesivo epóxi em pasta e fluido para ancoragem.

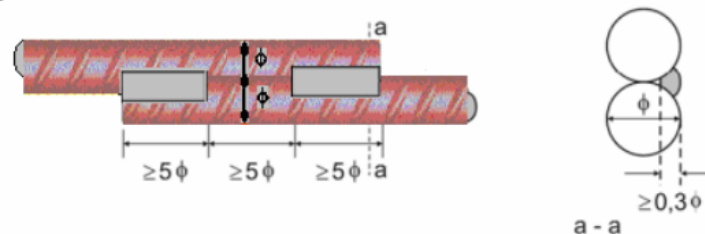


Fonte: Granato (2002).

Em casos que seja possível a soldagem das armaduras de reforço, as mesmas podem ser feitas de diversas formas, sendo comumente utilizado o transpasse com soldas em filetes uniformemente distribuídos, conforme figura 21.

Figura 21: Solda em filetes nas armaduras emendadas por transpasse.

por transpasse



Fonte: Alonso (2006).

2.9 Manutenção predial e critérios de desempenho estrutural

A manutenção predial é um conjunto de atividades planejadas, preventivas ou corretivas com o objetivo de preservar as condições de funcionamento, segurança e conservação de edifícios. Ela desempenha um papel essencial na garantia da durabilidade e do desempenho da edificação, seja ela residencial, comercial, industrial ou pública. As normas técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) têm um papel crucial na padronização dos procedimentos de manutenção predial no Brasil. A principal norma relacionada à manutenção predial é a NBR 5674 (ABNT, 2012), que define diretrizes para a gestão da manutenção em edifícios.

A Norma Brasileira NBR 5674 (ABNT, 2012), intitulada "Procedimentos para Manutenção de Edifícios", é um documento técnico que oferece diretrizes para a gestão da manutenção em edifícios, abrangendo todas as etapas do ciclo de vida de uma edificação, desde a construção. Essa norma estabelece princípios gerais e orientações para o planejamento e a execução da manutenção, incluindo:

- **Planejamento da Manutenção:** A norma indica a importância de planejar estrategicamente a manutenção, estabelecendo objetivos, metas, recursos e planos de ação. Isso envolve desenvolver um plano personalizado que leve em consideração as características específicas do edifício.
- **Inspeções e Diagnósticos:** A NBR 5674 (ABNT, 2012) descreve os procedimentos para realizar inspeções periódicas, avaliações de desempenho e diagnóstico das condições do edifício. Isso inclui identificar possíveis problemas, falhas, desgastes ou deteriorações.
- **Execução da Manutenção:** A norma orienta sobre como executar as atividades de manutenção, incluindo contratar serviços especializados, adquirir materiais adequados e organizar uma equipe dedicada à manutenção.
- **Documentação e Registros:** A norma estabelece que seja feito o registro e a documentação de todos os programas de manutenção, como relatórios

técnicos e laudos, para que seja acompanhado o desempenho da edificação ao longo do tempo.

- Melhoria Contínua: Além do plano de manutenção predial, a NBR 5674 (ABNT, 2012) incentiva que seja feita a melhoria contínua no processo de manutenção das edificações, para que assim seja alcançada a excelência no gerenciamento de manutenções.

Além da NBR 5674 (ABNT, 2012), existem outras normas que se aplicam a aspectos mais detalhados, com a norma de desempenho das edificações, a NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece critérios de desempenho para as edificações.

Na NBR 15575-2 (ABNT, 2013) é abordado os requisitos de desempenho estrutural de uma edificação, esta seção estabelece diretrizes e critérios para o desempenho das estruturas de edifícios residenciais, incluindo aspectos como a resistência, estabilidade, segurança e durabilidade dessas estruturas.

Os principais temas abordados pela Parte 2 da norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013) são:

- Resistência e estabilidade: A norma define critérios para garantir a resistência e estabilidade das estruturas ao longo de sua vida útil. Isso envolve a especificação de materiais adequados, dimensionamento correto das estruturas e análise da carga e capacidade de carga.
- Segurança estrutural: A norma trata da segurança dos ocupantes do edifício em relação a eventos como terremotos e incêndios. Ela define critérios para garantir que a estrutura seja capaz de resistir a esses eventos e manter a integridade do edifício.
- Durabilidade: A durabilidade das estruturas é um aspecto fundamental abordado na norma. Ela estabelece requisitos para evitar o deterioramento prematuro da estrutura, considerando fatores como exposição a agentes ambientais, como umidade, chuva, vento, entre outros. Ainda, para a norma é importante que o requisito de durabilidade seja mantido durante a vida útil da edificação.

- Vida útil de projeto(VUP): A norma estabelece uma vida útil de projeto(VUP) mínima para cada sistema dentro da edificação.

Tabela 7: VUP mínima para cada sistema.

Sistema	VUP mínima em anos
Estrutura	≥ 50 Conforme ABNT NBR 8681
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20
* Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.	

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

- Vida útil(VU): A norma estabelece como o tempo que a edificação, seus sistemas e elementos prestam as condições para o qual foram projetados.

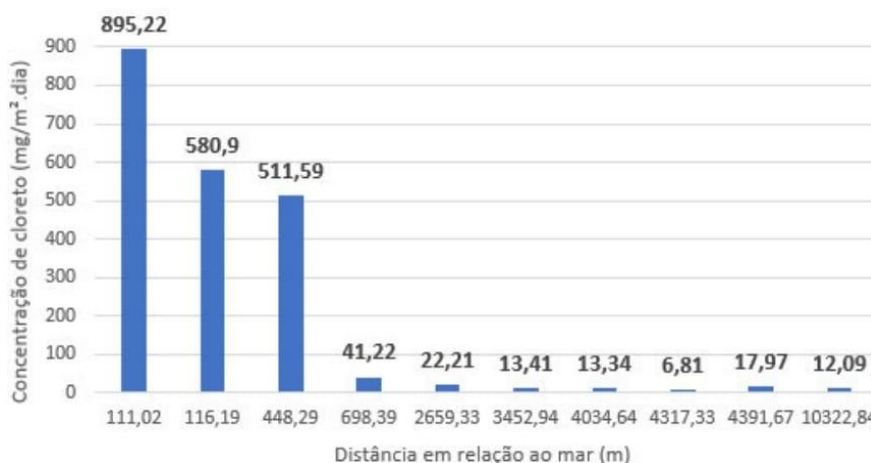
3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da edificação.

O Edifício estudado fica localizado na cidade de Aracaju-SE, mais especificamente no bairro 13 de julho, em frente ao Rio Sergipe, próximo ao mar. Por ser uma edificação construída há cerca de 40 anos, ficou notória a necessidade de reparos na estrutura, principalmente por ter apresentado infiltrações em seu sistema de juntas de dilatação, que acarretaram na deterioração de alguns elementos estruturais da garagem do edifício. Durante muito tempo houve acesso direto de águas contaminadas combinadas com a alta presença de íons cloreto no ambiente agressivo. Esses fatores associados à incompatibilidade normativa entre a agressividade ambiental e o cobrimento nominal dos elementos de concreto, fizeram a edificação necessitar de reparos em sua estrutura.

Segundo Prata, Carvalho e Lopes (2019), a região de Aracaju-SE tem um ambiente bastante agressivo, principalmente pela alta presença de íons cloreto no ambiente agressivo próximo ao mar e que, segundo os autores, tem sua principal influência a distância da região com o mar, que pode ser observado no gráfico da figura 22.

Figura 22: Gráfico de influência da distância em relação ao mar na concentração de cloreto na cidade de Aracaju-SE.



Fonte: Prata, Carvalho e Lopes (2019).

A Partir desse gráfico, é possível comparar os valores da concentração de cloreto em relação ao mar com a cidade de João Pessoa-PB, por exemplo, em que Meira e Padaratz (2002) fazem a mesma relação que Prata, Carvalho e Lopes (2019), conforme tabela 8.

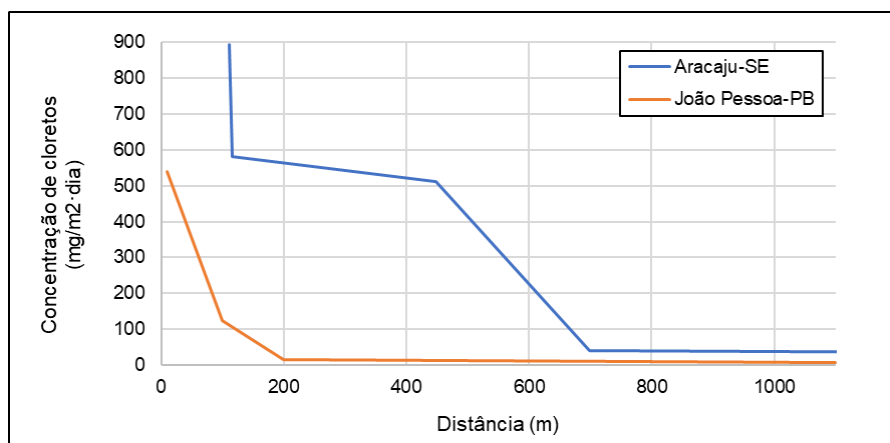
Tabela 8: Concentração de cloretos pelo método da vela úmida na cidade de João Pessoa-PB.

Distância (m)	Concentração de cloretos média – Novembro a Março (mg/m ² .dia)
10	540,74
100	125,26
200	13,89
500	11,74
1100	5,95

Fonte: Meira e Padaratz (2002).

Mesclando esses dois trabalhos, é possível fazer um comparativo da concentração de cloretos em relação ao mar em ambas as cidades conforme gráfico da figura 23.

Figura 23: Gráfico comparativo da concentração de cloretos em relação ao mar nas cidades de Aracaju-SE e João Pessoa-PB.



Fonte: Autor (2023).

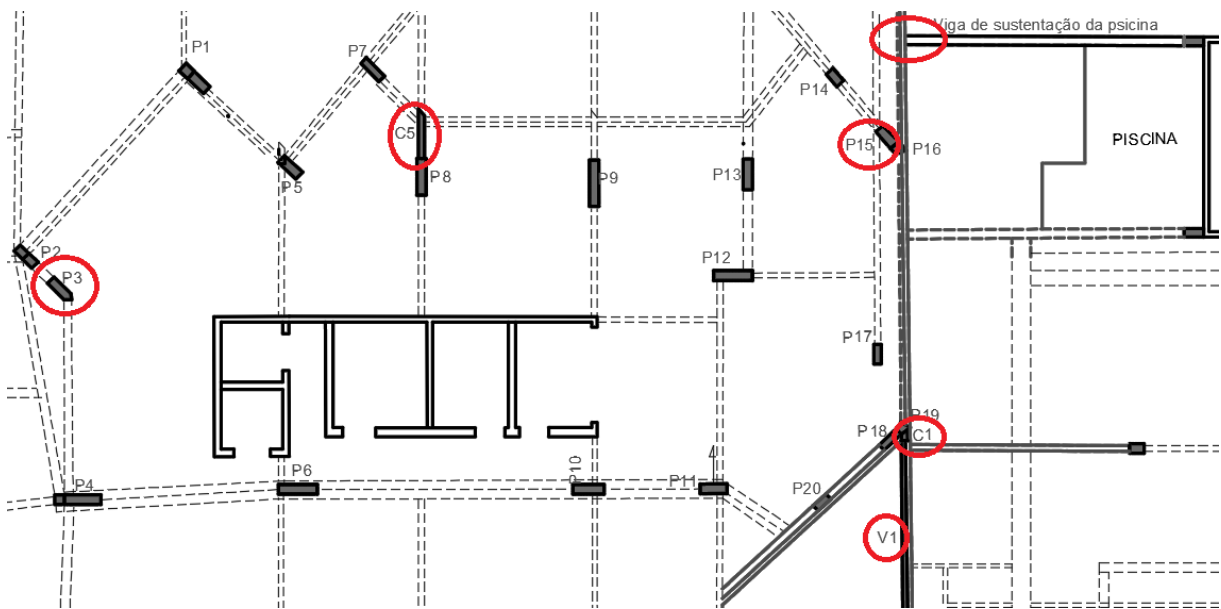
Apesar da alta influência da presença de íons cloreto no ambiente onde a edificação fica localizada, percebeu-se também a severidade da carbonatação devido ao confinamento do CO₂ emitido pelos veículos na garagem subterrânea do edifício e à ventilação deficiente daquele local. Logo, boa parte dos elementos recuperados apresentaram processo de corrosão generalizada das armaduras que,

também é segundo Cascudo (1997), agravada pelo processo de carbonatação do concreto.

3.2 Elementos Estudados no processo de recuperação estrutural

Os elementos estudados no estudo de caso foram os que apresentaram maior grau de comprometimento no processo de recuperação estrutural, visto que esses contribuíram mais para a abordagem do trabalho, os mesmos são apresentados no croqui da figura 24, e sua análise visual no quadro 1.

Figura 24: Croqui do pavimento garagem.



Fonte: Autor (2023).

Quadro 1: Elementos estudados e análise visual (continua).

Elemento Estrutural	Análise Visual	Registros para análise
C1	Sem corrosão aparente	

C5	Sem corrosão aparente	
V1	Sem corrosão aparente	
P3	Com corrosão aparente	
Viga de sustentação da piscina	Com corrosão aparente	
P15	Com corrosão aparente	

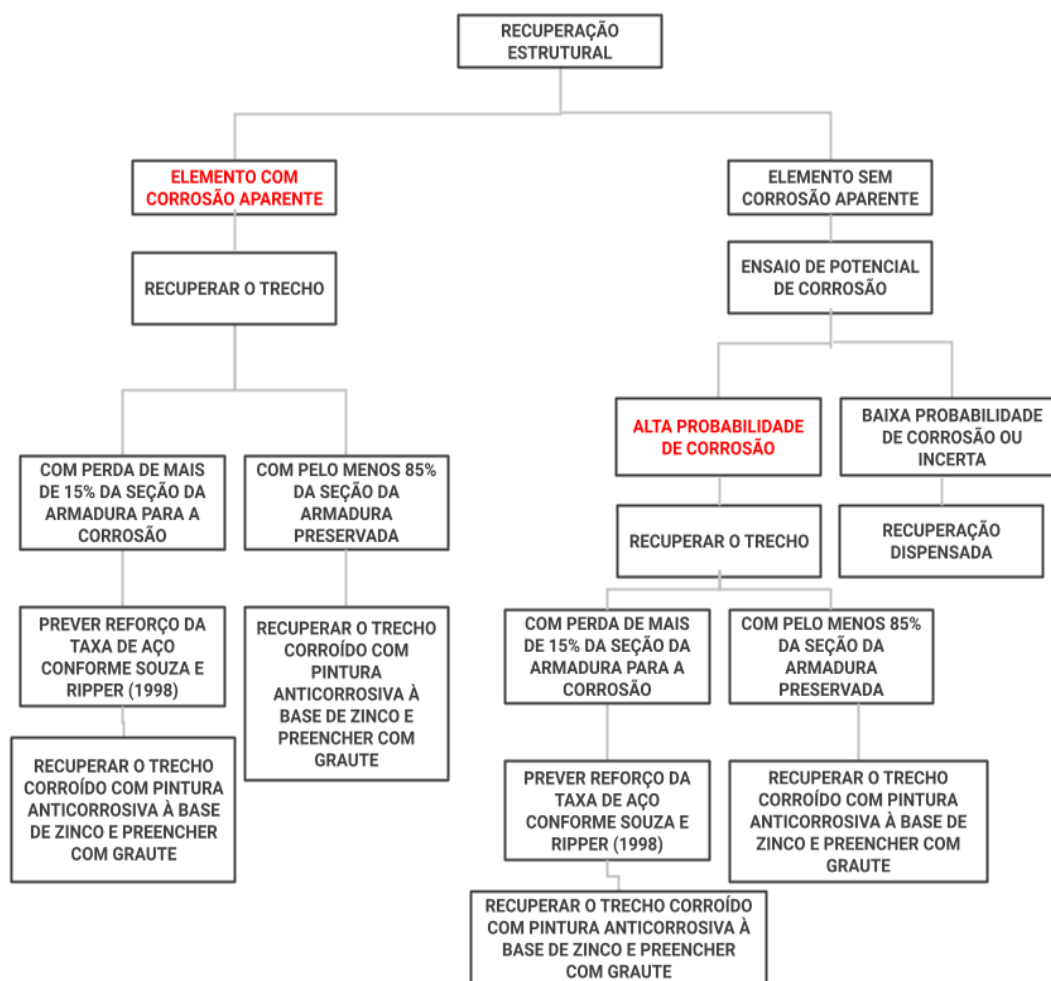
Fonte: Autor (2023).

3.3 Métodos empregados no processo de recuperação

A recuperação estrutural executada nesses elementos seguiu os métodos expostos no item 2.8, onde aborda detalhadamente cada etapa e o embasamento

técnico para o emprego desses métodos. A análise prévia e a execução da recuperação seguiu de forma resumida os passos expostos no fluxograma da figura 25.

Figura 25: Fluxograma do processo de recuperação estrutural.



Fonte: Autor (2023).

Vale salientar, que, para os elementos que já apresentaram processo corrosivo aparente e não passaram pelo ensaio de potencial de corrosão, foi feito a recuperação removendo a camada de concreto até achar a armadura sã, com o intuito de identificar o trecho corroído, e não deixar nenhuma brecha para o avanço da corrosão em outras zonas. Entre os elementos estudados no processo de recuperação, os que foram ensaiados não apresentavam corrosão aparente, ou seja os ensaios de potencial de corrosão foram priorizados pelo demandante nos elementos sem corrosão aparente e auxiliaram na identificação da corrosão, que foi

averiguado na viga V1, e nos consoles C1 e C5. O principal ensaio para a determinação da prioridade de recuperação estrutural nesses elementos foi o ensaio de potencial de corrosão. Esse ensaio serviu como um norte para a identificação de corrosão nas armaduras e posterior recuperação dos elementos estruturais que não apresentavam visivelmente o processo corrosivo.

3.4 Materiais e Equipamentos utilizados na recuperação estrutural

Os materiais e equipamentos utilizados na execução dessas recuperações foram utilizados conforme cada etapa do processo de recuperação, que é abordado no item 2.8. O quadro 2 demonstra cada material e equipamento empregado em cada etapa.

Quadro 2: Materiais e equipamentos utilizados em cada etapa.

Etapa	Materiais	Equipamentos
Abertura da superfície de concreto	-	Martelete mecânico, ponteira, marreta, talhadeira, escoras metálicas ou de madeira e EPI's.
Limpeza da superfície da armadura	-	Lixa de ferro/aço e EPI's.
Tratamento das armaduras	Tinta anticorrosiva à base de zinco.	Pincel para aplicação de tinta e EPI's.
Reforço e suplementação de armaduras	Vergalhões de aço CA 50 e CA 60, adesivo estrutural epóxi(Compound) em pasta, arame recozido, eletrodos para solda.	Serra Circular, disco de corte para ferro, Máquina de solda, turquesa e EPI's.
Grauteamento da janela de intervenção	Graute a base de cimento, adesivo estrutural epóxi fluido, madeirite plastificado, sarrafo de pinus, prego.	Serra circular, disco de madeira, martelo, colher de pedreiro, balde metálico, pincel, pregos de madeira e EPI's.

Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos ensaios

O processo de recuperação estrutural em elementos de concreto comprometidos por corrosão deve ser executado em toda extensão do elemento que apresente algum grau de deterioração pelo processo corrosivo, visto que se o elemento recuperado deixar algum vestígio de processo corrosivo, este irá gerar uma diferença de potencial dentro do elemento estrutural, o que pode comprometer os resultados do processo de recuperação estrutural, e passar uma falsa impressão de resolução do problema (SOUZA e RIPPER, 1998). Sabendo disso, é de suma importância que sejam identificados previamente os trechos com grau considerável de processo corrosivo, que pode ser averiguado, por exemplo, pelo ensaio de potencial de corrosão.

Entretanto, é sabido conforme o que já foi explanado no tópico 3.3, que os elementos que já apresentavam visivelmente processo corrosivo não passaram pelo ensaio de potencial de corrosão, por determinação e preferência do demandante, o que acabou limitando a investigação desses elementos estruturais. Em contrapartida, os que não apresentaram processo de corrosão aparente, que foi o caso da viga V1(foto 1) e os consoles C1 e C5 passaram pelo ensaio de potencial de corrosão, o mesmo demonstrou os trechos que apresentavam alta probabilidade de corrosão (tabelas 9,10,11) de acordo com a tabela 4 da ASTM C - 876:2009.

Foto 1: Extensão de V1 ensaiada.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 9: Resultados do ensaio de potencial de corrosão na viga V1.

POTENCIAL DE CORROSÃO(mV)									
V1									
		-278,6	-283,1	-259,5	-248,5	-186,5	-125,2	-86,3	-21,6
-319,9	-308,3	-354	ABERTURA	-384,1	-357,4	-298,4	-223,3	-179,9	-129,4

Fonte: Autor (2023).

Na viga V1, o ensaio de potencial de corrosão ativou um alerta para a região que ficava próxima a abertura do mesmo, abertura essa que foi feita para a realização do ensaio. Sabendo disso, o processo de recuperação tomou como base esses resultados para a abertura da janela de intervenção conforme o passo a passo em 4.2.3.

Foto 2: Extensão de C5 ensaiado.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 10: Resultados do ensaio de potencial de corrosão no console C5.

POTENCIAL DE CORROSÃO(mV)							
C5							
		-345,7	-309,1	-302,2	-284,6	-269	-250,5
	-405,6	-358	-324,3	-304,1	-268,6	-244,9	-218
-524,7	-523,7	-401,7	ABERTURA	-270,9	-252,2	-184,3	-183,5

Fonte: Autor (2023).

O console C5, após o ensaio de potencial de corrosão, apresentou probabilidade elevada de processo corrosivo em sua extremidade, ao lado da abertura. Com isso, o processo de recuperação estrutural foi feito abrindo a janela de intervenção ao redor da abertura do ensaio em direção a extremidade do console conforme a abordagem feita em 4.2.2.

Foto 3: Extensão de C1 ensaiada.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 11: Resultados do ensaio de potencial de corrosão no console C1.

POTENCIAL DE CORROSÃO(mV)	
C1	
-490,7	-422,9
ABERTURA	-454,1

Fonte: Autor (2023).

O console C1, era o mais comprometido pelas infiltrações, e o ensaio de potencial de corrosão evidenciou isso, demonstrando em seus resultados o alto grau de corrosão em toda a extensão do console. Contudo, foi necessário fazer o processo de recuperação total desse console conforme o que foi abordado no passo a passo de sua recuperação no tópico 4.2.1.

Apesar do ensaio de potencial de corrosão ter sido o principal indicador para a recuperação estrutural nesses elementos, outros ensaios como o de profundidade de carbonatação auxiliou na identificação da possível causa para o processo de corrosão. Dentre os elementos estudados sem corrosão aparente, apenas na viga V1 e no console C5 foi executado o ensaio de carbonatação com aspersão de fenolftaleína conforme as fotos 4 e 5, respectivamente.

Foto 4: Viga V1 após aspersão de fenolftaleína.



Fonte: Autor (2023).

Na viga V1, foi possível averiguar a forte influência do processo de carbonatação do concreto, apresentando após aspersão da solução, zonas com pH baixo. É sabido que, conforme Cascudo (1997), a corrosão generalizada na armadura também pode ser uma consequência do processo de carbonatação, o que foi possível identificar no caso dessa viga, visto que suas armaduras apresentavam corrosão generalizada.

Foto 5: Console C5 após aspersão de fenolftaleína.



Fonte: Autor (2023).

No console C5 foi possível verificar que o pH do meio ainda se mantinha alcalino, levando a conclusão de que o processo corrosivo identificado, não foi causado pela carbonatação do concreto, mas pela presença de cloretos, visto que para Cascudo (1997) a corrosão por pites é consequência desse agente agressor, conforme foi identificado no processo de recuperação na foto 15, do item 4.2.2.

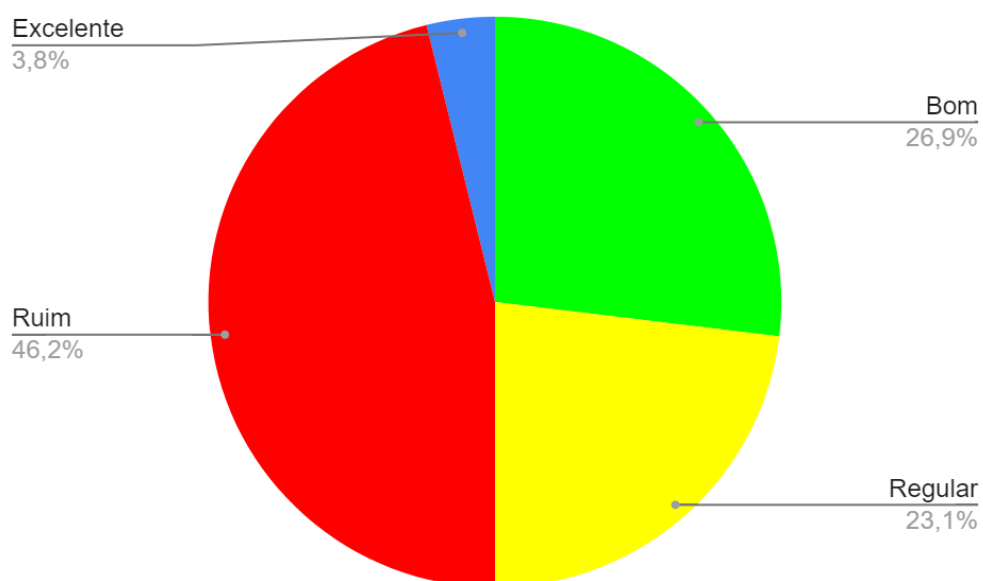
O ensaio de ultrassom e esclerometria nos elementos estruturais do pavimento garagem apresentaram resultados variados (tabela 12 e tabela 13), sendo esses dois ensaios realizados apenas para avaliar a qualidade e a uniformidade do concreto, sem influência direta no processo de recuperação dos elementos corroídos.

Tabela 12: Resultados do ensaio de ultrassom nos consoles e vigas do pavimento garagem.

Ensaio de ultrassonografia em concreto		
Elemento	VPU Média (m/s)	Qualidade
V4	3546,00	Bom
V5	3579,00	Bom
V6	3173,72	Regular
V7	3259,00	Regular
V9	2524,86	Ruim
V10	2842,65	Ruim
V11	4687,75	Excelente
V12	3449,55	Regular
V13	2528,51	Ruim
V14	3982,72	Bom
V15	3125,13	Regular
V16	3573,70	Bom
V17	2838,91	Ruim
V18	3152,19	Regular
V19	2923,13	Ruim
V20	2841,44	Ruim
V21	2071,58	Ruim
V22	2135,63	Ruim
V23	2607,37	Ruim
V24	2632,15	Ruim
V25	2833,83	Ruim
V26	2238,10	Ruim
C1	3522,00	Bom
C4	3422,00	Regular
C5	3584,19	Bom
C6	4147,00	Bom
C7	3848,00	Bom

Fonte: Autor (2023).

Figura 26: Gráfico de pizza da qualidade do concreto do pavimento garagem conforme ensaio de ultrassom.



Fonte: Autor (2023).

A Partir dos resultados do ensaio de ultrassom nas vigas e consoles do pavimento garagem, foi possível averiguar a qualidade do concreto nesses elementos, que por facearem as juntas de dilatação, sofreram com o passar do tempo com as infiltrações que ali ocorriam. A maioria dos elementos estruturais ensaiados resultaram em qualidade ruim, sendo possível levar em consideração que o confinamento de CO₂ na garagem associado às infiltrações no sistema de juntas de dilatação e o ambiente com altas concentrações de cloreto levaram a essa baixa de qualidade nessas vigas e consoles.

O ensaio de esclerometria também foi utilizado na análise da qualidade do concreto do pavimento garagem, a partir dos resultados foi possível averiguar o índice esclerométrico e fazer uma estimativa da resistência característica do concreto conforme tabela 13.

Tabela 13: Resultados do ensaio de esclerometria nos elementos do pavimento garagem.

Ensaio de Esclerometria em concreto		
Elemento	Índice esclerométrico	fck(Mpa)
V4	45,23	49,00
V5	42,74	45,00
V7	41,11	42,00
V10	42,53	45,00
V11	46,13	51,00
V12	46,88	52,00
V13	36,83	34,00
V14	45,51	50,00
V15	38,69	37,00
V16	44,64	48,00
V17	43,50	46,00
V18	44,69	48,00
V19	43,15	45,00
V20	44,34	47,50
V21	35,40	32,00
V22	42,30	42,00
V23	47,75	53,50
V24	45,91	50,00
V25	43,75	46,50
V26	42,00	42,00
C4	46,50	52,00
C5	42,00	44,00
C6	44,38	48,00
C7	46,70	52,00

Fonte: Autor (2023).

Apesar do ensaio de esclerometria ter dado resultados bastante uniformes e valores de dureza superficial excelentes, é sabido que o processo de carbonatação do concreto pode interferir no resultado desse ensaio. Como o pavimento garagem apresenta um confinamento de CO_2 e apresentou em alguns elementos indícios de carbonatação conforme ensaio de profundidade de carbonatação, pode-se aderir a

tese de que esses valores excelentes de índice esclerométrico podem ter sido influenciados pela carbonatação do concreto.

Contudo, foi possível identificar a colaboração do cobrimento insuficiente das armaduras no processo de corrosão abordados na recuperação estrutural, e a incompatibilidade normativa entre a NB-1/60 e a NBR 6118 (ABNT, 2023) mostrou-se preocupante na influência do processo corrosivo. O cobrimento insuficiente associado a quantidade enorme de agentes agressores no ambiente são as principais causas da corrosão identificada no trabalho.

4.2 Processo de recuperação estrutural executado nos elementos de concreto comprometidos por corrosão.

O processo de recuperação estrutural nas estruturas comprometidas por corrosão das armaduras foi executado de acordo com as especificações de Souza e Ripper (1998), seguindo rigorosamente as orientações dos autores para a execução correta deste tipo de manifestação patológica no concreto armado.

4.2.1 Console C1.

Esse console foi o elemento estrutural prioritário quanto às intervenções, devido a sua exposição constante a infiltrações e ao seu visível estado de degradação avançado. A partir de análise visual (foto 6) e do ensaio de potencial de corrosão (tabela 11) foi possível identificar que o concreto já estava em fase avançada de deterioração por conta, principalmente, da corrosão generalizada.

Foto 6: Console C1 antes da recuperação.



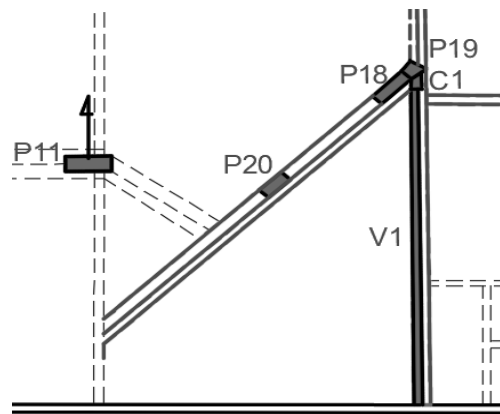
Fonte: Autor (2023).

O processo de recuperação estrutural desse console seguiu o seguinte passo a passo:

- Escoramento da laje e vigas do playground.

Como o console C1 servia de sustentação para duas vigas que sustentavam a laje do playground, conforme figura 27, foi decidido que as escoras seriam posicionadas tanto na laje do playground como nas vigas que as apoiavam, com a posição das escoras próximas ao apoio que seria recuperado conforme foto 7.

Figura 27: Disposição estrutural das vigas apoiadas em C1.



Fonte: Autor (2023).

Foto 7: Escoramento da laje e vigas do playground.



Fonte: Autor (2023).

- Escarificação mecanizada com martelete.

Após o processo de escoramento e redução das cargas no console, foi feita a escarificação do mesmo usando um martelete (foto 8), com a finalidade de expor as armaduras do elemento estrutural para o posterior tratamento das mesmas.

Foto 8: Escarificação com martelete do console C1.

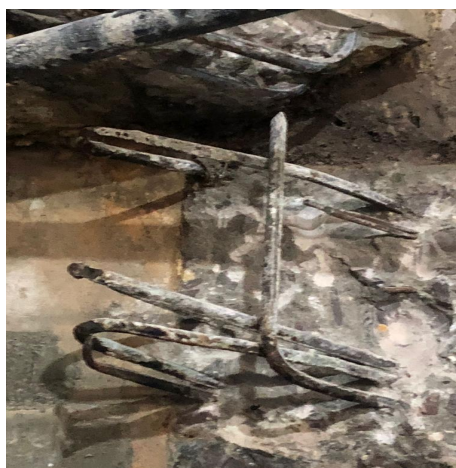


Fonte: Autor (2023).

- Suplementação das armaduras.

A Partir da análise visual do estado das armaduras do console, foi possível identificar significativa perda de seção das mesmas e consequente redução da taxa de aço conforme ilustrado na foto 9, o que comprometia a sua função estrutural.

Foto 9: Estado das armaduras do console C1.



Fonte: Autor (2023).

Foi decidido, após a avaliação do grau de deterioração, fazer a suplementação dessas armaduras (foto 10). Nas armadura principais foram utilizados vergalhões de aço CA-50 de 12,5mm e nas transversais, estribos CA-60 de 5mm, ancorando-os com adesivo estrutural epóxi, conforme orientação de Souza e Ripper (1998) e atendendo a equação apresentada pelos autores na figura 17.

Foto 10: Suplementação das armaduras do console C1.



Fonte: Autor (2023).

- Tratamento das armaduras.

Para o tratamento das armaduras foi utilizado o método dos revestimentos anticorrosivos, que nada mais é que a criação de uma camada de produto anticorrosivo à base de zinco sobre a armadura, a fim impedir o contato do entre os agentes agressivos e o aço, e adicionar um metal menos nobre (zinco) para ser sacrificado em benefício do aço (foto 11). Para isso, primeiro foi feito o lixamento manual da camada superficial de corrosão, logo após foi aplicado o revestimento à base de zinco.

Foto 11: Aplicação de revestimento anticorrosivo à base de zinco nas armaduras do console C1.



Fonte: Autor (2023).

- Preenchimento com graute.

Após o devido tratamento das armaduras comprometidas, foi feito o preenchimento do elemento estrutural utilizando argamassa fluida de alta resistência (graute) (foto 12), atentando ao disposto por Souza e Ripper (1998) na figura 14, e Granato (2002) na figura 15. Para a execução dessa etapa foi feito previamente a aplicação de adesivo estrutural epóxi na extremidade de concreto que iria receber o graute, a fim de garantir uma ponte de aderência entre os materiais (GRANATO, 2002).

Foto 12: Grauteamento do console C1.



Fonte: Autor (2023).

4.2.2 Console C5

No console C5 (foto 13), a recuperação estrutural foi executada em sua extremidade, conforme recomendação e interpretação do ensaio de potencial de corrosão executado nesse console (tabela 10).

Foto 13: Console C5 antes da recuperação.



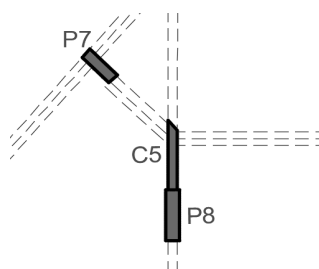
Fonte: Autor (2023).

O procedimento de restauração estrutural foi realizado de acordo com os seguintes passos:

- Escoramento de C5

Para a execução do reparo no console C5, foi feito primeiro um levantamento da disposição estrutural e das cargas que atuavam no console, ficando evidente, conforme figura 28, que o console recebia a carga de 3 vigas, sendo 1 de sustentação da laje do térreo, e as demais da laje do playground. Logo, foram posicionadas duas escoras metálicas em cada viga, próximo ao console, conforme foto 14.

Figura 28: Disposição estrutural das vigas apoiadas em C5.



Fonte: Autor (2023).

Foto 14: Escoramento do console C5.



Fonte: Autor (2023).

- Escarificação mecanizada com martelete.

Logo após o processo de escoramento do console, foi feita a escarificação do mesmo com o martelete, a fim de expor as armaduras e identificar visualmente o processo de corrosão, que foi confirmado (foto 15 e foto 16).

Foto 15: Identificação de processo de corrosão nas armaduras do console C5.



Fonte: Autor (2023).

Foto 16: Identificação de processo corrosivo na extremidade do console C5.



Fonte: Autor (2023).

- Suplementação dos estribos

Antes do processo de tratamento das armaduras, foi necessário fazer a suplementação de dois estribos que estavam danificados (foto 17). Para isso, foi feita a ancoragem de dois novos estribos na região danificada utilizando adesivo estrutural epóxi, com a finalidade de garantir a integridade estrutural e recompor as armaduras transversais, que são de suma importância em consoles.

Foto 17: Suplementação de estribos do console C5.



Fonte: Autor (2023).

- Tratamento das armaduras

Para o tratamento dessas armaduras, primeiro foi feito o lixamento manual das mesmas (foto 18), a fim de remover a camada superficial de corrosão. Logo após esse processo, foi aplicada a pintura anticorrosiva à base de zinco (foto 19) respeitando os intervalos entre demãos, com a finalidade de fornecer uma camada protetora contra o avanço da corrosão e restabelecer a camada passivadora do aço.

Foto 18: Lixamento manual das armaduras do console C5.



Fonte: Autor (2023).

Foto 19: Aplicação de pintura anticorrosiva à base de zinco no console C5.

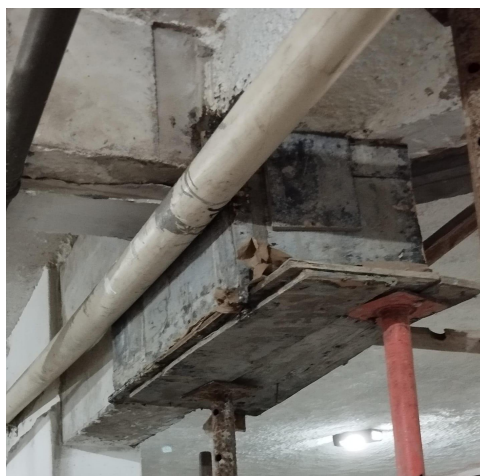


Fonte: Autor (2023).

- Grauteamento do console.

Semelhante ao processo descrito no console C1, o grauteamento foi executado com prévia aplicação de adesivo estrutural epóxi, para garantir a aderência entre o concreto da estrutura e o graute da recuperação. Logo após, foi posicionada a forma e preenchida com graute (foto 20).

Foto 20: Grauteamento do console C5.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3 Viga V1

Na viga V1 (foto 21), a recuperação estrutural foi executada na face inferior e no meio do vão da viga, removendo a camada de concreto e tratando as armaduras que apresentaram corrosão na extensão da janela de intervenção, conforme resultado do ensaio de potencial de corrosão (tabela 9).

Foto 21: V1 antes da recuperação.



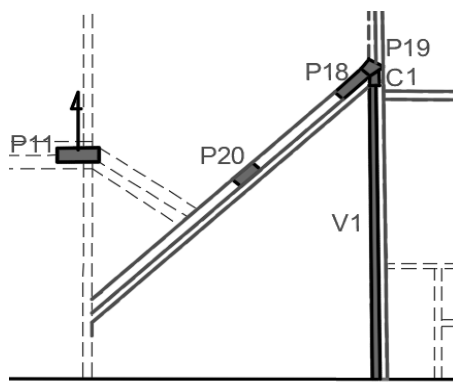
Fonte: Autor (2023).

A recuperação estrutural foi conduzida conforme os seguintes procedimentos:

- Escoramento da viga V1

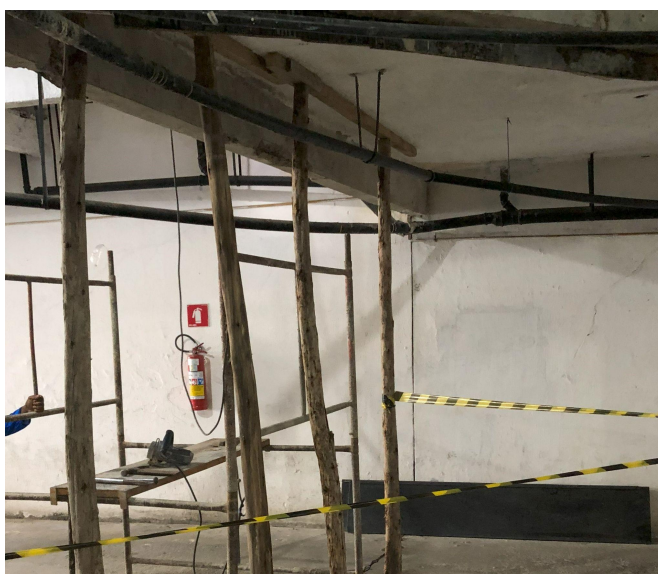
A viga V1, conforme figura 29, serve de sustentação para a laje do playground, sendo necessário seu devido escoramento a fim de aliviar as cargas na viga (foto 22).

Figura 29: Disposição estrutural da laje apoiada em V1.



Fonte: Autor (2023).

Foto 22: Escoramento da viga V1.



Fonte: Autor (2023).

- Escarificação mecanizada com martelete

Após o processo de escoramento, foi feita a escarificação do concreto que revestia as armaduras inferiores, a fim de expô-las (foto 23) e prosseguir com o processo de tratamento.

Foto 23: Armaduras da viga V1 expostas.



Fonte: Autor (2023).

- Tratamento das armaduras

Para a execução do processo de tratamento das armaduras, primeiro foi executado o lixamento manual (foto 24) e aplicação da pintura anticorrosiva à base de zinco (foto 25), a fim de garantir a proteção do aço contra avanço da corrosão.

Foto 24: Armaduras após lixamento manual.



Fonte: Autor (2023).

Foto 25: Pintura anticorrosiva à base zinco nas armaduras da viga V1.



Fonte: Autor (2023).

- Grauteamento da viga

O grauteamento da viga V1 foi feito após o tratamento das armaduras e a colocação da forma (foto 26). Para o grauteamento dessa viga, foi previamente aplicado adesivo estrutural epóxi em toda extensão do concreto que iria receber o graute, para garantir uma ponte de aderência entre os diferentes materiais, evitando assim retração e fissuração com o tempo (GRANATO, 2002).

Foto 26: Grauteamento da Viga V1.



Fonte: Autor (2023).

4.2.4 Pilar P3

O pilar P3 foi um dos elementos que estavam com a sua armadura em contato direto com o ambiente, visto que uma peça de aço perdida dentro do pilar serviu como uma pilha eletroquímica, conduzindo o processo de corrosão para as

armaduras do pilar conforme fotos 27 e 28. Sabendo disso, foi aberta uma janela de reparo no pilar com o propósito de encontrar a zona que sofreu corrosão devido a esse contato.

Foto 27 e 28: Peça de aço exposta dentro do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

Foto 29: Pilar P3 antes da recuperação.



Fonte: Autor (2023).

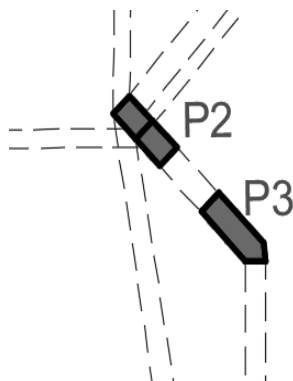
A recuperação estrutural foi conduzida seguindo os passos a seguir:

- Escoramento do Pilar P3

Pelo fato do pilar P3 ser um pilar de sustentação da torre do edifício, foi decidido fazer um escoramento na laje que descarregava 1/12 do percentual da sua carga, pelo fato do edifício ter 12 pavimentos tipo. Sabendo disso, foi efetuado o

escoramento próximo ao pilar (foto 30), com a finalidade de aliviar as cargas sobre ele, conforme figura 30.

Figura 30: Disposição estrutural do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

Foto 30: Escoramento pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

- Escarificação mecanizada do pilar.

O processo de escarificação da janela de intervenção do pilar foi feita com o objetivo de encontrar o trecho onde a corrosão estava acentuada, ou seja, foi feita a abertura no trecho onde começa a corrosão, até onde é interrompido o processo de corrosão conforme a foto 31.

Foto 31: Armadura comprometida do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

- Suplementação dos estribos.

Durante o processo de escariação da janela de intervenção, foi identificada uma perda significativa em um estribo (foto 32), sendo necessário sua suplementação, que foi feita com aço CA-60 de 5.0mm e ancorada utilizando adesivo epóxi.

Foto 32: Estribos do pilar P3 comprometidos.



Fonte: Autor (2023).

- Tratamento das armaduras

Similarmente ao processo descrito nos outros elementos estudados, também foi feito para o tratamento dessas armaduras corroídas, o lixamento manual das mesmas (foto 33), com o intuito de remover a camada superficial da corrosão, e logo após foi aplicada a pintura anticorrosiva a base de zinco (foto 34), com a finalidade de promover uma camada protetora contra o avanço do processo de corrosão.

Foto 33: Lixamento das armaduras do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

Foto 34: Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

- Grauteamento da janela de intervenção

Após o devido tratamento das armaduras comprometidas, foi feito o processo de grauteamento da janela de intervenção, seguindo o mesmo passo a passo dos outros elementos estudados conforme foto 35.

Foto 35: Grauteamento do pilar P3.



Fonte: Autor (2023).

4.2.5 Viga de sustentação da piscina suspensa.

Para a viga da piscina suspensa, foi adotado a recuperação da sua extremidade, pois a mesma apresentou processo de corrosão em sua ligação com a viga de transição (foto 36 e foto 37), prejudicando a segurança e a rigidez dessa ligação.

Foto 36 e 37: Viga de sustentação da piscina suspensa com armadura exposta em sua cabeceira.



Fonte: Autor (2023).

A recuperação estrutural foi realizada de acordo com os passos descritos a seguir:

- Escoramento da viga da piscina

Como essa viga servia de sustentação para a piscina do playground (figura 31), foi solicitado o rebaixamento da lâmina d'água (foto 38), com o intuito de diminuir a carga a ela imposta.

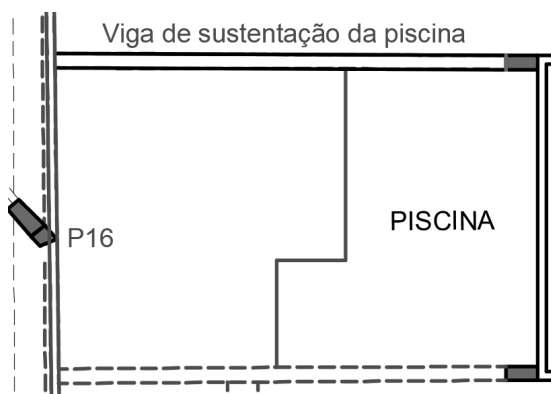
Foto 38: Rebaixo de lâmina d'água da piscina.



Fonte: Autor (2023).

Além disso, o escoramento da viga foi feito utilizando escoras metálicas em sua cabeceira, e escoras metálicas na laje que contribui com o carregamento da viga conforme foto 39.

Figura 31: Disposição estrutural dos elementos no entorno da viga de sustentação da piscina.



Fonte: Autor (2023).

Foto 39: Escoramento da viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

- Escarificação mecanizada da cabeceira da viga.

A abertura da janela de intervenção na viga foi feita em sua cabeceira, justamente no encontro com a viga de transição, onde se identificou o processo de corrosão (foto 40 e foto 41).

Foto 40 e 41: Abertura da janela de intervenção na cabeceira da viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

- Suplementação das armaduras.

Nas fotos 40 e 41 fica evidente a perda de seção das armaduras de ligação entre as duas vigas. Sabendo disso, foi decidido fazer a suplementação das mesmas usando barras de aço CA-50 de 10mm transpassando-as pelo trecho comprometido, respeitando a equação de Souza e Ripper (1998) na figura 17.

Além disso, as emendas das barras de reforço foram feitas com solda elétrica em filetes de 50 mm espaçados a cada 50mm (fotos 42 a 44), pois a armadura de reforço era de 10 mm conforme figura 21. Esse tipo de emenda teve como finalidade garantir uma melhor solidarização entre as armaduras comprometidas e as de reforço.

Foto 42 e 43: Suplementação das armaduras de reforço na viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

Foto 44: Soldagem em filetes da armadura de reforço na viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

- Tratamento das armaduras.

O tratamento das armaduras foi feito conforme os outros elementos recuperados, ou seja, lixando-os manualmente para remoção da camada superficial de corrosão, e logo após aplicado à pintura anticorrosiva à base de zinco conforme fotos 45 e 46.

Foto 45: Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras da viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

Foto 46: Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco nas armaduras da viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

- Grauteamento da cabeceira da viga.

O processo de grauteamento nessa viga foi feito executando uma forma que permitisse a permanência do vão da junta de dilatação, visto que essa cabeceira da viga fazia a junta de dilatação (foto 47). Além disso, conforme executado nas outras recuperações abordadas no presente trabalho, foi aplicado um adesivo epóxi sobre a superfície do concreto, para garantir uma boa aderência entre o concreto e o graute.

Foto 47: Grauteamento da cabeceira da viga da piscina.



Fonte: Autor (2023).

4.2.6 Pilar P15

Para a execução da recuperação estrutural do pilar P15, foi primeiro identificado visualmente a região que apresentava indícios de corrosão, que foram manchas marrom avermelhadas e armadura exposta próxima à junta de dilatação, com isso foi feito o processo de escariação com martetele para identificar o problema, logo após, foi constatado processo avançado de corrosão em uma das armaduras principais do pilar, com elevada redução de seção conforme as fotos 48 e 49.

Foto 48 e 49: Identificação de perda de seção da armadura principal do pilar P15 e da viga que o faceia.



Fonte: Autor (2023).

- Suplementação das armaduras

A suplementação da armadura principal do pilar foi feita utilizando uma barra de aço CA-50 de 10mm, visto que a seção da armadura principal que tinha 10mm estava drasticamente comprometida, e para esse caso foi necessário fazer a suplementação total desta seção conforme equação da figura 17, garantindo que o transpasse comece e termine em região sã (SOUZA e RIPPER, 1998).

- Tratamento das armaduras

Para a execução do tratamento das armaduras, foi feito primeiro o lixamento manual de toda extensão comprometida, e logo após foi aplicado tinta anticorrosiva à base de zinco, conforme a foto 50.

Foto 50: Aplicação de pintura anticorrosiva a base de zinco no pilar P15.



Fonte: Autor (2023).

- Grauteamento do pilar

O processo de grauteamento do pilar foi executado conforme as outras recuperações estudadas, ou seja, aplicando adesivo estrutural epóxi em toda extensão do concreto que irá receber o graute, e, após isso, aplicado a fôrma e preenchido a janela de intervenção com graute (foto 51).

Foto 51: Janela de intervenção do pilar P15 preenchida com graute.



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÕES

Atualmente, um dos temas mais abordados na Engenharia civil é a manutenção e a integridade de edificações antigas, principalmente quando associado ao fato da construção civil estar seguindo a mesma tendência mundial de envelhecimento das pessoas. Logo, é debatido em todo o mundo as formas de manter e repor a integridade dessas edificações, que ano após ano sofrem com a idade e as manifestações patológicas, que como nos humanos, costumam aparecer com bastante frequência na velhice.

Com isso, fica evidente a partir da análise do trabalho, a importância da manutenção predial em edificações antigas e próximas ao mar, principalmente quando se tratam dos elementos estruturais. Os problemas e as manifestações patológicas nestes tipos de edificação tem se tornado cada vez mais frequente no Brasil, com foco principal na deterioração dos elementos de concreto, que com o passar dos anos tem demonstrado alta vulnerabilidade aos ataques de agentes externos agressivos, provindos principalmente da alta concentração de cloretos nos ambientes costeiros e na elevada taxa de CO₂ em ambientes urbanos.

A incompatibilidade normativa entre a NB-01/60 e a NBR 6118:2023 em termos de agressividade ambiental tem se mostrado um empecilho na análise de estruturas antigas e próximas ao mar, principalmente quando se trata da espessura de cobrimento dos elementos estruturais, que com o passar dos anos e as atualizações normativas, já não mais atendem. Sabendo disso, é importante por parte dos profissionais de Engenharia a abordagem mais ampla dos impactos que essa incompatibilidade normativa pode causar em edificações antigas, pois é evidente a contribuição primordial do cobrimento do concreto na preservação da camada passivadora do aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. São Paulo, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais - Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os Sistemas Estruturais - Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-1: **Cálculo e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: **Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16616: **Ensaio não destrutivo: ultrassom convencional**. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8802: **Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Method for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. ASTM C876-09. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2009.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão de vida útil de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre, 2001. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ALONSO, Marcelo de Barros. **Caracterização de união por solda de topo em barras CA-50 com eletrodos revestidos**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

BOLINA, Fabrício. L; TUTIKIAN, Bernardo. F; HELENE, Paulo Roberto D. L.
Patologia de estruturas. São Paulo: Oficina do Texto, 2019.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Co-edição, São Paulo: Ed. PINI, Goiânia: Ed. UFG, 1997.

ESCOBAR, C.J; CRUZ, D.A; FABRO, G. **Avaliation of Concrete Rebound Hammer Performance of the tests with Hardened Concrete**. ANAIS DO 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC 2008.

E. F. Felix, T. J. Rodrigues Balabuch, M. Corrêa Posterlli, E. Possan, R. Carrazedo (2018), “**Análisis de la vida útil de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión uniforme por medio de un modelo con RNA acoplado al MEF**”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 16 – 29, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

FÉLIX, E. F.; RODRIGUES BALABUCH, T. J. CORRÊA POSTERLLI, M.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. **Service life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM**. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 1 - 15, 31 Jan. 2018.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 1996.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. **Procedimientos de reparación y protección de armaduras. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón**. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira , 2003.

GRANATO, José Eduardo. **Patologia das construções**. São Paulo, 2002. (Apostila).

HELENE, P. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. Pini, 2ª ed. São Paulo, 1992.

HELENE, Paulo Roberto Lago; PEREIRA, Fernanda. **Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto**. São Paulo, 2007.

HUSNI, RAUL et. al **Acciones sobre las estructuras de hormigón. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón**. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira , 2003.p. 39-108.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Pini, 2002.

MEIRA, G. R. PADARATZ, I. J. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos**. 44º. Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

MORESI, Caroline Costa; BELLAGUARDA, Ingrid Lima. **Metodologia eficiente para a detecção de corrosão em estruturas de concreto armado**. Pró-Reitoria Acadêmica Curso de Engenharia Civil, 2016.

NASCIMENTO, F. B. C. **Corrosão em armaduras de concreto**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 177–188, 2015. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/2651>. Acesso em: 12 set. 2023.

OLIVEIRA, Daniel Ferreira. **Levantamento de causas de patologias na construção civil**. Rio de Janeiro, 2013.

PRATA, Ana Larissa Cruz; DE CARVALHO, Carlos Henrique; LOPES, Francisco Luiz Gumes. **Fatores Que Influenciam a Concentração de Íons Cloreto na Atmosfera Urbana de Aracaju/se**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 4, n. 1, 2019.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5. ed. Gerda, 2015.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Quartzolit Weber, 2023. **Como garantir boa aderência em correções estruturais e emendas de elementos de concreto novos e antigos**. Disponível em: <https://www.quartzolit.weber/solucoes-tecnicas-quartzolit-para-reparos-protecao-e-reforco/como-garantir-boaderencia-em-correcoes-estruturais-e-emendas-de-elementos-de-concreto-novos-e-antigos>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

RODRÍGUEZ, José Coscollano. **Restauración y Rehabilitación de Edificios**. Editorial Paraninfo, Madrid, Espanha, 2003.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1 ed. Pini. São Paulo. 2003.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

WHITEHURST, E. A. **The Soniscope A Device for Field Testing of Concrete**. 1951.