



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WESLEY CHAVES MARTINS RIBEIRO

**ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES DE TÉCNICAS DE REPARO PARA ARMADURAS EM
CONCRETO ARMADO AFETADOS POR CORROSÃO: ESTUDO DE CASO**

Recife
2024

WESLEY CHAVES MARTINS RIBEIRO

**ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES DE TÉCNICAS DE REPARO PARA ARMADURAS
EM CONCRETO ARMADO AFETADOS POR CORROSÃO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Tibério Wanderley
Correia de Oliveira Andrade

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ribeiro , Wesley Chaves Martins.

Análise e recomendações de técnicas de reparo para armaduras em concreto armado afetados por corrosão: estudo de caso / Wesley Chaves Martins Ribeiro . - Recife, 2024.

65 p : il., tab.

Orientador(a): Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Técnicas de reparo estrutural. 2. Fluxograma de reparo estrutura. 3. Recuperação estrutural. 4. Execução de técnicas de reparo. 5. Corrosão das armaduras. I. Andrade , Tibério Wanderley Correia de Oliveira . (Orientação).
II. Título.

620 CDD (22.ed.)

WESLEY CHAVES MARTINS RIBEIRO

**ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES DE TÉCNICAS DE REPARO PARA ARMADURAS
EM CONCRETO ARMADO AFETADOS POR CORROSÃO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 18/04/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tibério Wanderley Correia de
Oliveira Andrade
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rubens Alves Dantas
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Civil Rodrigo Antônio Pereira de Moraes
CREA - Nº 181366835-3
TECOMAT Engenharia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha saúde e determinação para chegar até aqui.

Aos meus pais, Petrônio e Vera Cristina, quero agradecer de todo meu coração, pois são minha maior fonte de inspiração, agradeço ao meu irmão, Rodrigo, e a todos os meus familiares que me permitiram estar aqui hoje, tios, tias, avós e primos, em especial aqueles que colaboraram diretamente para minha graduação.

Agradeço também aos meus professores e profissionais de educação desde o infantil até a graduação, todos foram de extrema importância para minha formação quanto profissional e crescimento quanto pessoa, em especial aos professores Tibério Andrade e Liliane Fonseca.

Por fim agradeço a todos os meus amigos e colegas do curso, na qual caminhamos juntos durante todo o período da graduação, vencendo todos os desafios e trabalhos acadêmicos.

“Eu sou parte de uma equipe. Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence. De certa forma termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas!”. Ayrton Sena

RESUMO

A corrosão das armaduras em elementos de concreto armado é um problema cada vez mais comum em edifícios, muitas vezes devido à falta de manutenção, a defeitos construtivos ou mesmo pelo envelhecimento natural das estruturas. Diante dessa realidade, torna-se crucial o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas para reparar e recuperar essas estruturas afetadas pela corrosão. Este trabalho visa justamente desenvolver tais técnicas, baseando-se em literatura especializada e no conhecimento prático de empresas que executam e fiscalizam esse tipo de serviço. Além disso, busca-se demonstrar a execução dessas técnicas por meio de um estudo de caso, acompanhados de registros fotográficos que ilustram todas as etapas do processo, assim como os materiais e equipamentos utilizados. O resultado alcançado é uma apresentação clara e didática de todas as etapas do procedimento, facilitando o entendimento tanto para o leitor quanto para o profissional interessado em realizar esse tipo de serviço. O emprego dessas técnicas não apenas garante a reabilitação das estruturas, mas também contribui para a segurança e durabilidade das edificações.

Palavras-chave: Técnicas de reparo estrutural. Fluxograma de reparo estrutural. Recuperação estrutural. Execução de técnicas de reparo. Corrosão das armaduras.

ABSTRACT

The corrosion of reinforcements in reinforced concrete elements is an increasingly common problem in buildings, often due to lack of maintenance, construction defects and natural aging concrete structures. Faced with this reality, the development and improvement of techniques to repair and recover these structures affected by corrosion becomes crucial. This work aims precisely to develop such techniques, based on specialized literature and practical knowledge from companies that execute and oversee this type of service. Furthermore, it seeks to demonstrate the execution of these techniques through case studies, accompanied by photographic records illustrating all stages of the process, as well as the materials and equipment used. The achieved result is a clear and didactic presentation of all stages of the procedure, facilitating understanding for both the reader and the professional interested in performing this type of service. The use of these techniques not only guarantees the projected lifespan of the structures but also contributes to the safety and durability of buildings.

Keywords: Structural repair techniques. Structural repair flowchart. Structural recovery. Execution of repair techniques. Corrosion of reinforcements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilar com armadura exposta devido ao avançado estágio de corrosão das armaduras.	20
Figura 2 - Célula de corrosão no meio concreto armado.	23
Figura 3 - Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto.	23
Figura 4 - Carbonatação do concreto.	24
Figura 5 - Descolamento do concreto após corrosão por carbonatação.	25
Figura 6 - Corrosão por contaminação de íons cloreto.	26
Figura 7 - Destacamento do concreto, causa pela corrosão.	27
Figura 8 - Ponteiro de aço.	31
Figura 9 - Ponteiro de aço para martetele.	31
Figura 10 - Serra mármore.	32
Figura 11 - Escova de cerdas de aço manual.	32
Figura 12 - Escova de aço circular para esmerilhadeira.	33
Figura 13 - Removedor de ferrugem e fosfatizante.	33
Figura 14 - Primer anticorrosivo a base de zinco.	34
Figura 15 - Adesivo epóxi estrutural.	35
Figura 16 – Área de reparo após finalização do processo de demolição, com as armaduras expostas.	39
Figura 17 - "Lay out" esperado da área a ser reparada.	40
Figura 18 - Escovação manual das armaduras.	41
Figura 19 - Representação do As,corr e As.	42
Figura 20 - Aplicação manual do primer anticorrosivo.	43
Figura 21 – Espaçador de concreto fixado na armadura.	45
Figura 22 - Reparo com forma, utilizando argamassa de reparo fluida.	45
Figura 23 - Aplicação de argamassa polimérica tixotrópica.	46
Figura 24 - Fluxograma de execução das técnicas de reparo.	47
Figura 25 - Andaime suspenso de 3 metros no local do reparo.	49
Figura 26 - Fissuras verticais e horizontais no emboço do caixão da escada.	49
Figura 27 - Locais com concreto desagregado e armaduras expostas.	50
Figura 28 - Profissional realizando a demolição do emboço.	50
Figura 29 - Ponto de corrosão encontrado após demolição do emboço.	51

Figura 30 - Locais que já haviam passado pelo processo de reparo estrutural.	52
Figura 31 - Medição da argamassa de reparo com uso do paquímetro.	52
Figura 32 - Remoção do concreto deteriorado.	53
Figura 33 - Medição do comprimento da armadura íntegra.	54
Figura 34 - Delimitação da superfície.	54
Figura 35 - Escovação do aço com uso de escova circular.	55
Figura 36 - Verificação das bitolas das barras de aço com paquímetro.	55
Figura 37 - Identificação dos estribos deteriorados.	56
Figura 38 - Ancoragem dos estribos finalizada.	57
Figura 39 - Reposição do final do concreto, com acabamento com desempoladeira.	58
Figura 40 - Processo de mistura da argamassa de reparo tixotrópica.	58
Figura 41 - Espaçadores e formas instalados no caso de reparo com argamassa fluida.	59
Figura 42 - Resultado final do reparo após retirada da forma.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela 6.1 NBR 6118 – Classes de agressividade ambiental (CAA).....	28
Tabela 2 - Tabela 7.1 NBR 6118 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.	29
Tabela 3 - Tabela 7.2 NBR 6118 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	16
1.2	OBJETIVOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO ARMADO.....	18
2.1.1	Durabilidade e vida útil	18
2.1.2	Manutenção	19
2.2	CORROSÃO.....	20
2.2.1	Corrosão pela carbonatação do concreto.....	24
2.2.2	Corrosão por cloretos	26
2.3	FATORES AGRAVANTES QUE DESENCADEIAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	31
3.1.1	Ferramentas	31
3.1.2	Escova de cerdas de aço	32
3.1.3	Removedor de ferrugem e fosfatizante.....	33
3.1.4	Primers	34
3.1.5	Adesivo estrutural.....	35
3.1.6	Argamassas para reparo estrutural	36
3.1.6.1	<i>Argamassa de reparo fluida.....</i>	<i>36</i>
3.1.6.2	<i>Argamassa de reparo tixotrópica.....</i>	<i>37</i>
3.1.7	Equipamentos e materiais auxiliares	37
3.2	EXECUÇÃO DAS TÉCNICAS DE REPARO	37
3.2.1	Inspeção	38
3.2.2	Preparo e delimitação superfície	39
3.2.3	Limpeza das armaduras	40
3.2.4	Reposição do concreto	43
3.3	FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO.....	46
3.4	INTERVENÇÃO EM CASOS ESPECIAIS	48
4	ESTUDO DE CASO	48
4.1	INSPEÇÃO	49

4.2	REPARO	53
4.2.1	Reparo com argamassa tixotrópica	57
4.2.2	Reparo com argamassa fluida	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1	CONCLUSÕES.....	60
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da construção civil, é evidente o progresso nas inovações dos materiais e técnicas empregados na construção de edifícios. Com o avanço do conhecimento sobre o concreto e os métodos de cálculo estrutural, juntamente com considerações econômico-financeiras, as estruturas passaram a ser projetadas com margens de segurança mais reduzidas, resultando em estruturas mais esbeltas (REIS, 2001).

Apesar do vasto conhecimento adquirido ao longo da história e do significativo avanço na Engenharia Civil, ainda é comum encontrar estruturas com desempenho abaixo do esperado. Isso se deve a uma variedade de fatores, como falhas de projeto, seleção inadequada de materiais, falta de qualificação da mão de obra e o inevitável processo de envelhecimento, todos contribuindo para a deterioração dessas construções (SOUZA; MURTA, 2012).

Existem diversos mecanismos que contribuem para a deterioração das estruturas de concreto armado, podendo ser divididos em mecânicos, físicos e químicos. Dentre os fenômenos causados pelos mecanismos químicos, notavelmente, a corrosão das armaduras desempenha um papel crucial nessa deterioração. Assim, examinar, avaliar e identificar as manifestações patológicas em uma construção, incluindo a corrosão das armaduras, são procedimentos que devem ser conduzidos de forma regular e organizada, garantindo que as medidas de manutenção adotadas estejam alinhadas com a efetiva restauração da estrutura sempre que necessário (GRANATO, 2002).

A corrosão das armaduras no concreto armado ou protendido, sendo um processo natural e contínuo, leva ao aço a se transformar em óxido de ferro, comprometendo o desempenho mecânico da estrutura ao longo do tempo (GENTIL, 1996). Diante dessa preocupação, a norma NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto, dedica atenção especial à proteção contra a corrosão das armaduras. Ela estabelece requisitos específicos, como f_{ck} mínimo e relação água/cimento máxima para o concreto, cobrimento mínimo para as armaduras, e o controle da fissuração máxima, todos em função da agressividade ambiental, como métodos de proteção das armaduras contra a corrosão.

Assim a análise das manifestações patológicas e dos reparos em elementos estruturais representa um campo crítico de estudo e prática dentro da engenharia civil, estendendo-se além da simples manutenção de estruturas. Isso porque envolve questões econômicas e de segurança. Assim, a busca e o desenvolvimento de soluções eficazes e sustentáveis para reparos em elementos estruturais são essenciais para restaurar as condições originais e prolongar a vida útil das estruturas. Isso, por sua vez, reduz os custos a longo prazo associados aos possíveis riscos relacionados à capacidade resistente das estruturas.

Estima-se que as atividades relacionadas com a avaliação, reparação e restauro de estruturas representem 35% do volume total das obras no sector da construção e este número continua a aumentar (GARCIA-ALONSO et al, 2007).

No contexto em que as técnicas de reforço e recuperação estão constantemente evoluindo, observa-se um aumento considerável na diversidade de materiais disponíveis no mercado. Contudo, é crucial ressaltar que o simples dimensionamento adequado do reforço ou reparo de um elemento não é suficiente quando é dimensionado baseado em premissas incorretas ou imprecisas. Antes de iniciar esse processo, é fundamental que o engenheiro examine cuidadosamente todas as variáveis envolvidas.

Esse processo consiste em identificar as manifestações patológicas, a necessidade de intervenção imediata, disponibilidade de recursos e acesso aos locais de intervenção, tratar as causas subjacentes, considerar a durabilidade da estrutura, escolher a técnica mais apropriada para o reforço e/ou reparo, e realizar uma análise criteriosa dos custos envolvidos. Isso se deve ao fato de que, em geral, o processo de recomposição e/ou reforço de estruturas é mais complexo e oneroso do que a construção de um novo elemento (NAKAMURA, 2009).

Importante ressaltar que, para Aranha (1994), o reparo, assim como a recuperação, tem como dever restituir a funcionalidade e segurança original do elemento de concreto. De acordo com Andrade (1997), o objetivo do reparo é restaurar a parte danificada de um elemento estrutural sem a necessidade de adicionar um novo elemento ou aumentar as seções de aço e concreto da estrutura já existente. Nakamura (2009) destaca que, para reestabelecer a integridade física de elementos

estruturais e garantir os níveis de resistência iniciais, pode ser necessário a substituição de barras corroídas ou danificadas.

Portanto, pode-se considerar que a reposição de elementos deteriorados ainda está incluída no âmbito do reparo estrutural. Conforme Aranha (1994), o reforço estrutural ocorre quando há a necessidade de aumentar a capacidade de um elemento ou de uma edificação como um todo, através da introdução de novas armaduras e/ou aumento da seção de concreto.

Outro fator crucial a ser destacado, especialmente no contexto de edificações habitacionais: as novas exigências de desempenho estabelecidas pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Essa norma está intimamente relacionada à qualidade e durabilidade das estruturas de concreto, pois define os requisitos mínimos de desempenho para edificações residenciais, abordando aspectos de segurança, conforto e durabilidade. Embora não aborde diretamente os procedimentos de reparo em concreto, ela desempenha um papel fundamental nessa questão, incentivando práticas de manutenção adequadas, incluindo a realização de reparos quando necessário, para assegurar que as estruturas continuem a atender aos requisitos de desempenho ao longo do tempo

1.1 Justificativa e motivação

Quando se trata de projetar novas estruturas de concreto armado ou protendido, os engenheiros estruturais têm à sua disposição uma ampla gama de Normas Técnicas e uma vasta literatura especializada. No entanto, a situação muda consideravelmente ao lidar com o reparo de elementos estruturais danificados ou ao tentar estimar sua capacidade de carga residual. Nesses casos, a falta de Normas Técnicas específicas e a presença de aspectos ainda obscuros tornam o processo desafiador. Adicionalmente, os materiais de referência focados em recuperação e reforço de estruturas de concreto muitas vezes priorizam técnicas e processos de execução em detrimento do próprio projeto, o que acrescenta uma camada extra de complexidade (SOUZA E RIPPER, 1998).

A indústria da construção civil é frequentemente caracterizada por sua natureza tradicional e pela relutância em adotar mudanças significativas em seus métodos.

Muitas vezes, ainda se observam práticas de gestão antiquadas e uma resistência considerável à implementação de inovações tecnológicas. Além disso, problemas históricos, como a falta de qualidade no processo construtivo e no produto final, ainda são tolerados em certa medida. A prevenção de problemas estruturais e a realização de manutenções regulares para evitar a deterioração das estruturas ainda não recebem a devida atenção (GONÇALVES, 2015).

Nesse contexto, destaca-se a relevância de trabalhos e pesquisas a respeito das técnicas de reparo em concreto armado afetados pela corrosão, pois contribuem significativamente para a manutenção e segurança das estruturas. As técnicas de reparo em armaduras que apresentam corrosão não apenas ajudam a restaurar a vida útil e a integridade das edificações, através de orientações essenciais para a recuperação de estruturas afetadas por essa manifestação patológica, mas também são cruciais na proliferação da recorrência desses problemas no futuro.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar técnicas disponíveis para reparos em elementos de concreto afetados por corrosão nas armaduras, destacando a importância de todo o processo executivo, oferecendo uma visão abrangente das etapas envolvidas por meio de um estudo de caso.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Apresentar, com base na literatura existente, os principais fatores que causam a corrosão das armaduras.
- Descrever o processo de execução das técnicas de reparo em elementos de concreto armado.
- Executar técnicas de reparo através de um estudo de caso.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Propriedades do concreto armado

2.1.1 Durabilidade e vida útil

A priori, a norma NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece requisitos para o projeto de estruturas de concreto armado e protendido. Ela exige que essas estruturas sejam projetadas e construídas de forma a manter a sua segurança, estabilidade e funcionalidade ao longo de sua vida útil, conforme definido na fase inicial de projeto. Além disso, ela define durabilidade como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Segundo Souza e Ripper (1998) a durabilidade é o elemento que conecta a as características de deterioração do material concreto e dos sistemas estruturais, a uma construção particular, personalizando-a através da análise de como ela responderá aos impactos do ambiente agressivo. Assim, ela determina o período de tempo em que a construção permanecerá funcional e resistente.

Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), a vida útil de projeto (VUP) é conceituada como período de tempo em que características das estruturas de concreto permanecem constantes, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Já a NBR 15575 (ABNT, 2013) refere-se à vida útil (VU) como período de tempo em que esses elementos são capazes de desempenhar suas funções conforme projetados e construídos, desde que os serviços de manutenção sejam adequadamente realizados.

Em síntese, a análise da vida útil deve abranger aspectos amplos de projeto, incluindo o planejamento, a implementação, os materiais utilizados, a utilização, o funcionamento e a manutenção, com foco no desempenho, qualidade e sustentabilidade (HELENE, 1997).

2.1.2 Manutenção

As manutenções regulares são imprescindíveis para garantia da integridade dos materiais, bem como para estender a vida útil e a durabilidade das estruturas. Quanto mais tempo os materiais conseguirem manter suas características e propriedades diante das influências ambientais, mais benéfico será para os usuários de um empreendimento (CÁNOVAS, 1988).

Para que a estrutura se mantenha no seu desempenho satisfatório, cabe ao contratante contratar um profissional habilitado para produzir um plano de manutenção de acordo com o manual de utilização, inspeção e manutenção, conforme os requisitos da ABNT NBR 5674. Esta norma fixa os procedimentos de orientação para organização de um sistema de manutenção de edificações, não sendo o foco deste trabalho especificar um sistema organizacional de manutenção. Assim, esse documento deve ser redigido baseado nos projetos, materiais e produtos escolhidos para execução da obra, desempenhando os requisitos básicos para utilização e manutenção preventiva indicado no manual do proprietário.

No âmbito da manutenção das edificações, os reparos desempenham um papel crucial, uma vez que englobam todos os serviços realizados para corrigir a perda de desempenho decorrente da deterioração de seus componentes. Isso evidencia que o processo construtivo não se restringe ao momento de entrega da obra e sua utilização subsequente. As construções são de importância primordial para facilitar as atividades que nelas ocorrem, sendo crucial que mantenham condições apropriadas para o seu propósito. Elas devem resistir aos agentes ambientais que afetam seu desempenho, evitando-se o simples descarte das estruturas quando esse desempenho é comprometido, o que não é aceitável do ponto de vista econômico ou ambiental.

Segundo a norma NBR 5674 (ABNT, 2019), os serviços de manutenção devem ser previamente projetados e programados. Seu projeto deve incluir especificações detalhadas dos materiais e procedimentos de execução; desenhos e plantas, incluindo detalhes; programação de atividades, incluindo, quando necessário, a previsão de estágios intermediários para o controle da qualidade dos serviços realizados; dispositivos de sinalização e proteção dos usuários; instruções para procedimento em caso de imprevistos; o projeto deve prever acessos seguros a todos os locais da edificação onde sejam realizadas inspeções e serviços de manutenção. Devem ser

projetados de maneira a minimizar a interferência nas condições de uso normal da edificação durante a sua execução.

2.2 Corrosão

As estruturas de concreto armado podem apresentar, após seu processo construtivo alguns problemas que afetam diretamente a sua durabilidade e vida útil, o principal deles é a corrosão das armaduras, que resulta na deterioração das barras de aço incorporadas no interior do concreto. Portanto, é essencial entender em profundidade esse fenômeno e seu impacto causado nas estruturas de concreto armado.

A corrosão das armaduras é um processo complexo que pode comprometer significativamente a integridade estrutural das construções de concreto armado, como pode ser observado na Figura 1. Ao compreender os processos envolvidos na corrosão das armaduras, pode-se identificar fatores de risco, desenvolver estratégias de prevenção e intervenção, como técnicas de reparo direcionadas a solucionar a degradação decorrente da corrosão, e preservar a durabilidade e segurança das estruturas.



Figura 1 - Pilar com armadura exposta devido ao avançado estágio de corrosão das armaduras.

Fonte: De autoria própria.

A priori, deve-se entender que todos os materiais tem necessidade de atingir seu estado mais estável, ou seja, de menor nível de energia, no aço esse fenômeno é o fator determinante para o processo de corrosão, ou seja, um processo espontâneo da natureza. Porém, o ferro encontrado nas armaduras de concreto armado tem um comportamento diferente daqueles que estão expostos ao ar livre, uma vez que a alcalinidade do concreto, cria uma película passivante ao redor das superfícies das barras de aço, inibindo a ação dos agentes externos.

A corrosão da armadura geralmente ocorre devido à penetração de agentes agressivos, sendo o dióxido de carbono (CO_2) e íons cloretos (Cl^-) os principais agentes encontrados naturalmente no meio ambiente. Esses agentes podem atingir as armaduras através de fissuras, e pequenos capilares que se comunicam entre si e com a superfície externa dos elementos. Quando pelo menos um desses dois agentes atingem as armaduras, as mesmas que inicialmente estão protegidas quimicamente da corrosão pela elevada alcalinidade da pasta de cimento, são despassivadas. Após essa despassivação, que pode levar poucos anos ou décadas, a armadura está propícia a propagação da corrosão, que pode ter velocidades para bastantes distintas e dependera da disponibilidade simultânea de umidade e oxigênio no concreto.

O processo corrosivo em estágio avançado pode comprometer a integridade do elemento diminuindo a sua capacidade resistente, pela perda da seção do aço e sua aderência ao concreto, bem como o deslocamento da superfície do concreto. À medida que a corrosão avança, mais aço é exposto por esse deslocamento, acelerando o processo.

Polito (2006) descreve a corrosão química, na qual as armaduras estão expostas, como um processo onde ocorre uma reação entre o oxigênio e o aço, levando à formação de uma camada de óxido ferro, expansivo e solúvel em água. Esse fenômeno é geralmente lento, levando muito tempo para que ocorra perda significativa de seção, a menos que haja presença de outros gases oxidantes na atmosfera.

Por outro lado, a corrosão eletroquímica, que é a corrosão existente no aço no interior do concreto, surge da formação de uma célula de corrosão ou pilha, onde há um eletrólito presente e uma diferença de potencial entre diferentes pontos da superfície do aço.

Para entender melhor como ocorre o processo de corrosão tem-se que ter em mente que a água presente nos poros e capilares sempre presentes no concreto, devido ao equilíbrio higroscópico com o ar atmosférico é sempre alcalino. Essa água dissolve os hidróxidos alcalinos da pasta de cimento hidratada, produzidos nas reações de hidratação do cimento (CaOH_2 , NaOH e KOH), produzindo uma solução aquosa com pH próximo de 13, isto é, um pH extremamente alcalino.

Sempre que o nível de alcalinidade for superior a um valor próximo de 11, o aço no interior do concreto estará protegido da corrosão pela formação de um fino filme estável de óxidos de ferro que ficam bem aderidos à superfície da barra, “inibindo” a atividade química espontânea do metal.

De acordo com Souza e Ripper (1998), em qualquer caso o processo de corrosão do aço é eletroquímico, ou seja, dá-se pela geração de um potencial elétrico, na presença de um eletrólito, que no caso, é a solução aquosa existente nos poros e capilares do concreto, que está em contato com o próprio aço.

O deslocamento de elétrons da barra de aço, da região anódica para a região catódica da barra, leva a desestabilização do ferro, transformando-se em cátions ferro (Fe^{++}), que migra para a solução aquosa. Para que a pilha eletroquímica seja alimentada, os elétrons deslocados tem de ser consumidos na região catódica, pela reação com o oxigênio.

Desta forma, cria-se um efeito de pilha onde a corrosão instala-se pela geração de uma corrente elétrica dirigida do anodo para o catodo, através da água, e do catodo para o anodo, através do aço. No caso do concreto armado, as regiões de menor concentração de O_2 são as anódicas (Figura 2). Da combinação do cátion Fe^{++} com os ânions (OH^-) resulta o hidróxido ferroso, de cor amarelada, depositado no anodo e, no catodo, deposita-se o hidróxido férrico, de cor avermelhada. Estes dois produtos constituem a ferrugem, evidência mais clara da corrosão do aço.

Na essência, o aço é consumido nas regiões anódicas da pilha eletroquímica, enquanto se mantém totalmente íntegro nas regiões catódicas da pilha. Para que não exista a corrosão é necessário que o pH do concreto seja indicador de alcalinidade do composto e os agentes agressores não atinjam a armadura.

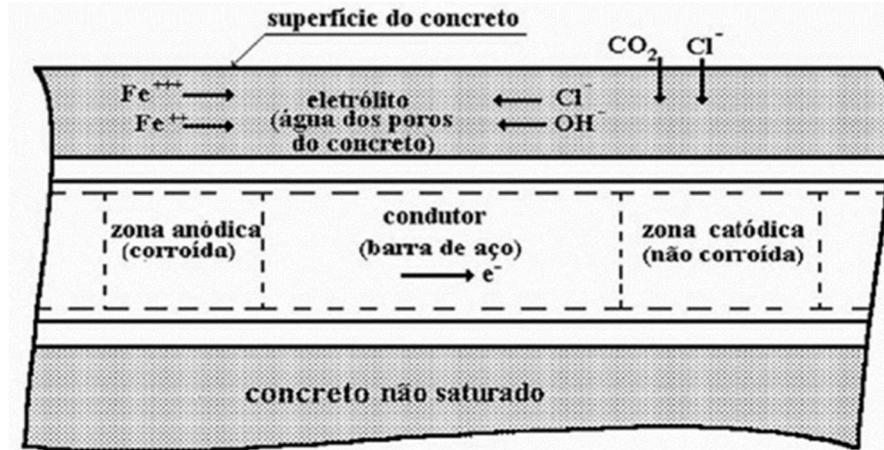


Figura 2 - Célula de corrosão no meio concreto armado.

Fonte: (SOUZA E RIPPER, 1998).

A classificação da corrosão também pode ser baseada em sua morfologia, sendo comumente dividida em três tipos: corrosão generalizada, corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante (Figura 3).

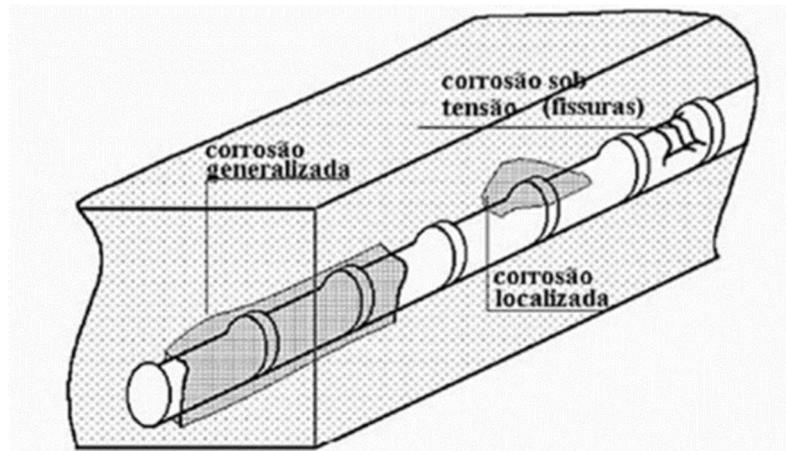


Figura 3 - Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto.

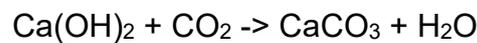
Fonte: (SOUZA E RIPPER, 1998).

Cascudo (1997) destaca que a corrosão generalizada afeta toda a barra de aço, podendo ser uniforme ou irregular em sua manifestação, geralmente esse tipo de manifestação ocorre em decorrência da carbonatação do concreto. Já a corrosão por pite ocorre em áreas específicas da barra, sendo exacerbada em locais onde a relação entre a área catódica e a área anódica é mais alta, causadas principalmente pela contaminação de íons cloreto. Por fim, a corrosão sob tensão fraturante é uma forma

de corrosão localizada que ocorre simultaneamente com a aplicação de tensão de tração.

2.2.1 Corrosão pela carbonatação do concreto

Para a NBR 6118 (ABNT, 2023) a despassivação por carbonatação ocorre por ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura. Helene (1993) definiu carbonatação, como, o processo de transformação dos compostos do cimento hidratado em carbonatos, por ação do gás carbônico (CO₂) gás carbônico, um processo lento, que obedece a seguinte reação:



Assim, a carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono (CO₂) presente no ar reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) no concreto para formar carbonato de cálcio (CaCO₃) e água. Essa reação reduz o pH do concreto, tornando o concreto simples mais resistente e impermeável a penetração de agentes agressivos. Porém a redução da alcalinidade nas regiões ao redor da armadura afeta diretamente as condições de estabilidade química da película passivadora do aço na estrutura de concreto (HELENE, 1993). Esse processo pode ser observado na ilustração adaptada de Emmons (1993), conforme a Figura 4.

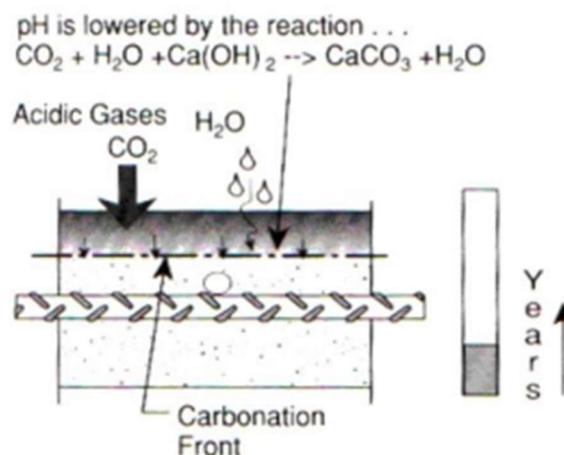


Figura 4 - Carbonatação do concreto.

Fonte: (EMMONS, 1993).

Esse processo de despassivação, torna o aço suscetível à corrosão, uma vez que as armaduras ficaram mais vulneráveis a exposição da umidade e do oxigênio,

devido à falta da película protetora. A corrosão generalizada das armaduras resulta fissuras e destacamentos no concreto, conforme Figura 5.

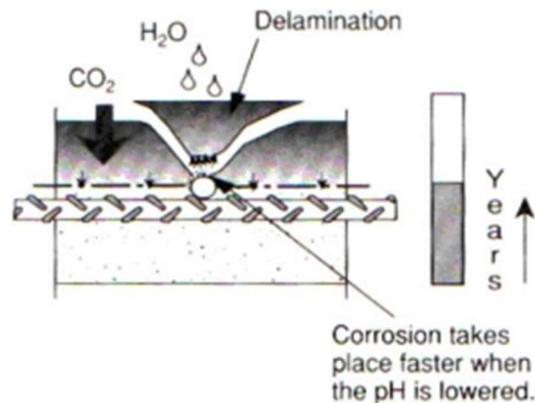


Figura 5 - Descolamento do concreto após corrosão por carbonatação.

Fonte: (EMMONS, 1993).

O processo de penetração do gás carbônico no concreto ocorre, principalmente, por difusão. Assim a velocidade de progressão da corrosão por carbonatação depende de vários fatores, incluindo a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, a qualidade do concreto, a espessura do cobrimento das armaduras e a permeabilidade do concreto. Segundo Helene (1993), a absorção capilar e a migração de íons não se aplicam neste caso.

Souza e Ripper (1998), afirma que, não ocorrerá carbonatação em concretos completamente saturados, posto que a difusão do CO_2 só pode ocorrer na presença de poros. Para exemplificar, segundo o autor, para uma umidade do ar de 85% a chance de ocorrer o processo de corrosão em um concreto carbonatado é quatro vezes maior, do que ocorrer em um concreto contaminado de cloretos, com concentração de 0,4% do seu peso em cimento.

Para prevenir ou retardar a corrosão por carbonatação, são adotadas medidas, como, aumentar a espessura do cobrimento das armaduras, utilizar concretos com baixa permeabilidade, aplicar revestimentos protetores, e manter ambientes com baixa concentração de dióxido de carbono. Segundo Helene (1993), ao dobrar o cobrimento das armaduras, corresponde a multiplicar por quatro a vida útil da estrutura de concreto armado, quando se trata de carbonatação, ou seja, a camada de cobrimento é tão relevante quanto a qualidade do concreto e concentração de CO_2 na atmosfera.

2.2.2 Corrosão por cloretos

A corrosão causada pela presença de cloretos se dá pela destruição da camada protetora do concreto, permitindo a entrada de íons cloreto provenientes do ambiente externo. Isso pode ocorrer devido à infiltração de cloretos através da água, à utilização de aditivos inadequados que contaminam a massa do concreto, ou mesmo pela presença de areia marinha na mistura (GRANTO, 2002).

A presença de íons cloreto inicia a formação de uma célula de corrosão, onde uma área com a capa passiva intacta atua como cátodo, produzindo oxigênio, e outra área onde a capa passivadora foi perdida atua como ânodo, causando corrosão (Figura 6). Esse processo é autocatalítico e se espalha de forma contínua. No ânodo, ocorre a formação de ácido devido à hidrólise do ferro na água pelos íons cloreto, reduzindo o pH localmente e perpetuando a intervenção dos íons cloreto na corrosão, agravando o problema.

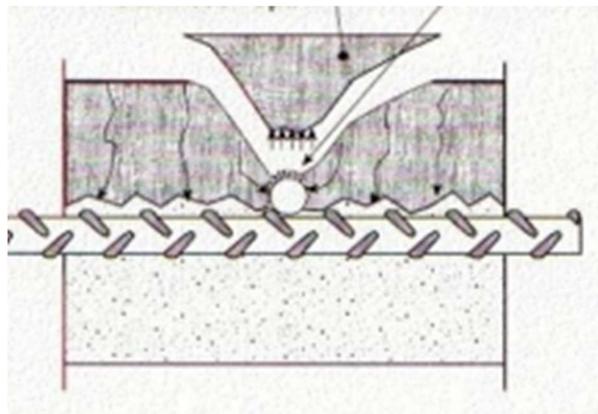


Figura 6 - Corrosão por contaminação de íons cloreto.

Fonte: Adaptado de Emmons, 1993.

É importante salientar que até o momento não há um acordo definitivo sobre o nível de cloretos necessário para desencadear a desativação das armaduras. Isso ocorre porque esse limite crítico varia de acordo com o tipo de cimento utilizado, a presença de aditivos, as condições de umidade do ambiente, o tipo de elemento estrutural, entre outros fatores (HELENE, 2011).

Segundo Li & Sagués, citado por Helene (2011), os valores da concentração crítica de cloretos podem variar entre 0,17 e 2,5% da massa de cimento.

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado devido à ação de cloretos é um desafio significativo, especialmente em ambientes marinhos ou em

estradas onde o sal é utilizado para derreter a neve. Quando os íons de cloreto penetram no concreto, eles podem alcançar as armaduras de aço embutidas. Esse processo pode resultar em uma ruptura pontual do aço após destruição da capa passivadora, gerando a formação dos produtos da corrosão, como óxidos de ferro, que ocupam um volume maior do que o aço original. Esse aumento de volume pode gerar tensões internas no concreto, levando a fissuras, destacamentos e perda de aderência entre o concreto e as armaduras, conforme podemos observar na Figura 7.

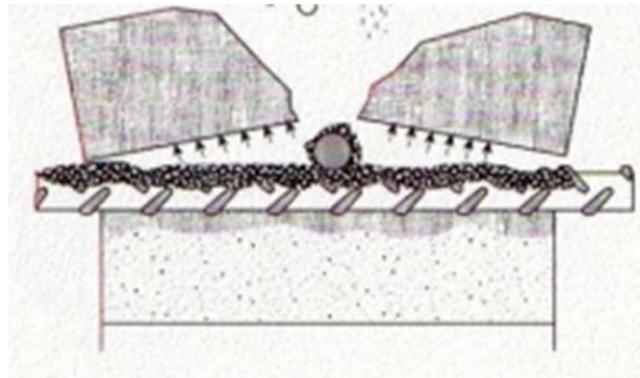


Figura 7 - Destacamento do concreto, causa pela corrosão.

Fonte: Adaptado de Emmons, 1993.

A progressão da corrosão por cloretos é influenciada por vários fatores, incluindo a concentração de cloretos, a porosidade e permeabilidade do concreto, a espessura do revestimento das armaduras, a temperatura e a umidade ambiental. Estruturas expostas a altos níveis de cloretos estão sujeitas a uma deterioração mais rápida das armaduras.

Para prevenir a corrosão por cloretos, são adotadas medidas como o uso de concretos com baixa permeabilidade, o aumento da espessura do revestimento das armaduras, a aplicação de revestimentos protetores, o uso de aditivos inibidores de corrosão e a manutenção de ambientes com baixa concentração de cloretos. A detecção precoce da presença de cloretos e a implementação de medidas de proteção adequadas são essenciais para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas de concreto armado.

2.3 Fatores agravantes que desencadeiam a corrosão das armaduras.

As manifestações patológicas nas construções, especialmente nas estruturas de concreto armado, podem ser originadas por uma diversidade de fatores e podem

surgir em todas as etapas do processo construtivo. Na fase de concepção, essas manifestações patológicas podem surgir devido a falhas nos projetos e no planejamento, além de erros de cálculo e especificação. Quando se trata de corrosão, pode-se listar alguns fatores que facilitam a penetração de agentes agressivos no concreto, desencadeando o processo de corrosão, de acordo com Novaes (2020) os principais são:

- Baixo cobrimento da armadura, dessa forma facilitando a entrada e saída de água e agentes agressivos;
- Tensões mecânica na estrutura, como esforços de tração e cisalhamento;
- Agentes agressivos externos e internos, podendo ser pelo ambiente em que a estrutura está inserida ou mesmo compostos que foram adicionados ao concreto;
- Concreto de baixa qualidade;
- Relação inadequada de água e cimento, podendo ser responsável pelo aumento de porosidade no concreto, facilitando a entrada e saída de água e agentes agressivos;

Por conta desses fatores a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece critérios de projeto que visam a durabilidade dos elementos estruturais, baseados principalmente em dois requisitos: o cobrimento nominal do concreto e relação água/cimento. Para definição destes requisitos, deve-se inicialmente definir a classe de agressividade ambiental (CAA), na qual é classificada de acordo com o tipo de ambiente que a estrutura está inserida, conforme demonstrada Tabela 6.1 (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabela 6.1 NBR 6118 – Classes de agressividade ambiental (CAA).

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

- ¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
- ²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.
- ³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: (NBR 6118, 2023)

Com a determinação da classe de agressividade ambiental, pode ser definida a relação água/cimento e classe do concreto, especificando o tipo de estrutura (Concreto armado ou protendido), de acordo com a Tabela 7.1 da norma (Tabela 2). Esses fatores são determinantes para a caracterização do concreto. Quanto menor o valor dessa relação, maior será a classe do concreto e mais protegida ficará a armadura, pois estão diretamente ligados a porosidade e a resistência do concreto.

Tabela 2 - Tabela 7.1 NBR 6118 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS

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

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

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

Fonte: (NBR 6118, 2023).

Outro fator importante que é definido pela classe de agressividade ambiental, é o cobrimento nominal das armaduras, que, depende também do tipo de elemento, conforme a Tabela 7.2 da norma (Tabela 3). O valor do cobrimento nominal é diretamente proporcional com a CAA, ou seja, um ambiente muito agressivo requer valores de cobrimentos maiores, por estar mais suscetível a ação de agentes externos, isto é, gás carbônico e íons cloretos.

Tabela 3 - Tabela 7.2 NBR 6118 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c=10\text{mm}$.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: (NBR 6118, 2023).

Assim, deve-se garantir correção desses fatores durante a execução do processo de reparo, para evitar futuros problema de corrosão das armaduras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento completo do sistema de execução, desde a identificação da manifestação patológica até a recomposição final do concreto, com base na revisão da literatura existente. Inicialmente, serão apresentados todos os materiais e ferramentas utilizados para a aplicação das técnicas de recuperação. Em seguida, serão detalhadas todas as etapas do processo, culminando com a apresentação de um fluxograma que resume todo o procedimento, facilitando o entendimento cronológico da recuperação.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Ferramentas

Para a remoção eficaz do concreto deteriorado, estas ferramentas se destacam por sua estrutura termicamente tratada, que confere uma resistência diferenciada nas extremidades de ponta e de golpe, capaz de suportar impactos com eficiência. Podem ser empregadas com êxito com o auxílio de uma marreta, porém o ponteiro de aço (Figura 8) apresenta resultados mais eficientes acoplado a martelete perfurador ou furadeira de impacto (Figura 9). A talhadeira é essencial para fazer delimitação inicial do local do reparo, porém o uso da serra mármore (Figura 10) é de extrema relevância, por conta da sua eficiência na execução desse processo.



Figura 8 - Ponteiro de aço.

Fonte: De autoria própria.



Figura 9 - Ponteiro de aço para martelete.

Fonte: (RESSEG DISTRIBUIDORA, 2024).



Figura 10 - Serra mármore.
Fonte: (LOJAS TAMOYO, 2024).

3.1.2 Escova de cerdas de aço

Encarregada do lixamento, limpeza e remoção completa dos resíduos mais espessos resultantes da corrosão, esta ferramenta é fundamental na preparação para tratamentos subsequentes, garantindo que as superfícies estejam livres de quaisquer contaminantes que possam prejudicar a aderência de materiais futuros.

No mercado, encontramos dois tipos de escovas: a manual e a circular para furadeiras e lixadeiras. A escova manual (Figura 11), apesar de não oferecer uma eficiência tão alta, destaca-se pela praticidade no uso devido à sua leveza e requisitos mínimos de operação, sendo excelente para pequenos reparos. Por outro lado, a escova circular para esmerilhadeira angular (Figura 12) é extremamente útil para reparos de maior escala devido à sua eficiência e rapidez, exigindo mão de obra mais especializada.



Figura 11 - Escova de cerdas de aço manual.
Fonte: De autoria própria.



Figura 12 - Escova de aço circular para esmerilhadeira.

Fonte: (MTX, 2024).

3.1.3 Removedor de ferrugem e fosfatizante

Este produto (Figura 13) é projetado para remover pequenas partículas de ferrugem de superfícies oxidadas, transformando o substrato em um fundo preto de fosfato. Sua comercialização e fabricação se dá por empresas fornecedoras de produtos químicos para área de recuperação estrutural.

A superfície gerada em torno das armaduras, com a aplicação desse produto é resistente e protetor, garantindo uma aderência superior entre o aço e os materiais circundantes. É importante aplicá-lo em toda a superfície do aço, assegurando que não haja resquícios de armaduras oxidada.



Figura 13 - Removedor de ferrugem e fosfatizante.

Fonte: (FERREIRA COSTA, 2024).

3.1.4 Primers

Esses produtos são aplicados diretamente nas armaduras após utilização do removedor de ferrugem. Podem ser formulados com resina epóxi enriquecida com zinco (Figura 14), que tem uma eletronegatividade superior à do aço, formando uma proteção catódica que age como um ânodo de sacrifício. Como o zinco não se expande durante a oxidação, não causa o desprendimento da camada protetora de concreto (GRANATO, 2002).

Indicado especialmente para a proteção das armaduras em ambientes contaminados por cloretos, desempenha um papel fundamental na passivação e preservação das armaduras contra a corrosão em trabalhos de reparo e reforço estrutural (REIS, 2001). Ao recobrir as armaduras de espera e outras superfícies metálicas, forma um filme impermeável com excelente aderência. Sua aplicação deve ser realizada em toda a superfície do aço, sem a adição de solventes.



Figura 14 - Primer anticorrosivo a base de zinco.

Fonte: (FERREIRA COSTA, 2024).

Apesar de ser indicado por várias literaturas, e utilizado pela maioria das empresas especializadas na execução de reparos, o uso do primer anticorrosivo ainda é uma dúvida quanto sua eficiência no processo de recuperação estrutural, uma vez que, quando é aplicada a argamassa ou concreto de reparo, é reconstituída a alcalinidade em torno do aço, repondo assim a película passivante que protege o aço de agentes externos. A ausência de normas que determinam em processo de reparo, ou orientam o uso desse produto, é uma barreira, quando se trata de realizar um reparo eficiente e econômico, tomando o preço elevado desse composto.

3.1.5 Adesivo estrutural

Como o nome sugere, os adesivos são substâncias empregadas para unir materiais a estruturas já estabelecidas, como na ancoragem de novas armaduras no concreto existente. No mercado, encontramos adesivos formulados com diferentes composições, tais como epóxi (Figura 15), PVA e acrílico.

Assim como os primers, os adesivos estruturais não são regimentados por norma, portanto não existem critérios mínimos e ensaios específicos para sua utilização. Portanto, as suas características e recomendações para utilização, são baseados no seu desempenho e uso em ancoragens ou colagem de elementos de concreto armado ao longo do tempo.

Para ancoragens de novas barras de aço no processo de recomposição das armaduras existente, é utilizado adesivo à base de epóxi consiste em polímeros disponíveis em duas partes distintas: o monômero e o catalisador. Após a combinação desses dois elementos, o material mantém uma consistência viscosa por um período específico, conhecido como "potlife". Em seguida, ele passa por um processo de endurecimento, alcançando uma resistência mecânica significativa. A mistura dos componentes deve ser realizada com um agitador, mecânico ou manual, assegurando uma homogeneidade completa (SOUZA & RIPPER, 1998). É importante garantir que a superfície de aplicação deve está livre de poeira e resíduos, garantindo uma melhor ancoragem.



Figura 15 - Adesivo epóxi estrutural.

Fonte: (FERREIRA COSTA, 2024).

3.1.6 Argamassas para reparo estrutural

São argamassas pré-fabricadas, que foram desenvolvidas para recuperação e reforço estrutural em elementos de concreto. Essas argamassas, são encontradas no mercado, geralmente, pelo seu nome usual, graute, derivada da palavra inglesa “Grout”, na qual é traduzida apenas como “argamassa”.

Os fabricantes dessas argamassas mencionam nas embalagens, além da sua resistência, algumas características do produto, como, baixa porosidade e permeabilidade, ausência de retração e elevadas resistências iniciais. Apesar de ser comum o uso dessas argamassas nos processos de reparo, não existe nenhuma norma que assegure essas características desse produto. Essa falta de normatização pode gerar uma série de dúvidas na qualidade e eficiência do produto, pois não há ensaios específicos para as características mencionadas pelos fabricantes.

Assim, considerando as características mencionadas pelos fabricantes, podemos também citar outros fatores cruciais que essas argamassas oferecem, como, o tempo reduzido de execução em comparação com o concreto convencional, o consumo mínimo de água, a capacidade de preencher espaços e cavidades de forma eficaz e sem formação de bolsões de ar. Também é importante mencionar a qualidade superior do acabamento, a facilidade de manuseio e sua excelente performance mesmo em condições desafiadoras de aplicação.

No Brasil, há empresas que fabricam argamassas pré-misturadas de cimento e areia, com adição de resina acrílica (SOUZA & RIPPER, 1998). Geralmente, essas argamassas são disponibilizadas em duas formas diferentes: a fluida e a tixotrópica.

3.1.6.1 Argamassa de reparo fluida

É uma argamassa autonivelante, comumente empregado em reparos horizontais ou verticais, com necessidade de utilização de forma para confinamento do produto. Essas argamassas por serem fluídas facilitam o preenchimento de cavidades difíceis de serem preenchidas, principalmente quando há uma alta densidade de armadura.

3.1.6.2 Argamassa de reparo tixotrópica

A argamassa cimentícia tixotrópica, é ideal para reposição do concreto em áreas onde a montagem de fôrmas é desafiadora, como fundo de vigas e lajes, o mesmo possui uma consistência mais densa em comparação a argamassa fluída. Por esse motivo, recomenda-se sua aplicação em camadas, assegurando que todo o espaço da peça de concreto seja preenchido até alcançar o recobrimento necessário.

3.1.7 Equipamentos e materiais auxiliares

Para a utilização de certas ferramentas mencionadas anteriormente, é essencial contar com equipamentos elétricos adequados, tais como esmerilhadeiras e martelões. Em circunstâncias específicas, pode ser necessário empregar um misturador de ação forçada, como misturadoras e betoneiras, especialmente para volumes significativos de argamassa de reparo.

É importante destacar que, para a execução correta das técnicas que envolvem o uso de formas, os executantes também devem dispor de alguns materiais auxiliares, tais como arame recozido, pregos, pinos de aço e chapa compensada resinada ou plastificada.

3.2 Execução das técnicas de reparo

A ausência de normas pertinentes a respeito de reparos em estruturas de concreto armado, gera um grande desafio na padronização das técnicas de execução e dos materiais utilizados. Desse modo, o sucesso de realizar um reparo correto e eficiente, está diretamente ligado na confiabilidade nas características dos produtos empregadas pelos fabricantes, bem como na execução de técnicas que foram desenvolvidas e registradas nas literaturas ao longo dos anos.

Apesar da inexistência de uma norma específica são utilizadas diretrizes de normas pertinentes, como, a NBR 6118 (ABNT, 2023) na determinação do recobrimento adequado e ancoragem de novas armaduras e NBR 14931 (ABNT, 2003) para os espaçadores.

A seguir, será apresentado um guia detalhado de execução, baseado em literaturas existente, incluindo dicas e diretrizes estabelecidas por empresas de consultoria do ramo.

3.2.1 Inspeção

Segundo AGUIAR, J. E. 2016, antes de executar uma recuperação estrutural, deve-se seguir uma metodologia de identificação de manifestação patológicas, cujo primeiro passo é efetuar inspeções preliminares para avaliação e detalhamento das manifestações patológicas e monitoramento dos sintomas, dentre eles as fissuras e trincas.

Portanto, inicialmente, são realizadas inspeções para diagnosticar as áreas afetadas pela corrosão das armaduras. Essas inspeções consistem em exames visuais das estruturas de concreto armado, onde são selecionadas áreas que apresentam sinais visíveis de corrosão para uma revisão detalhada. Durante essa análise minuciosa, são examinadas as condições das armaduras e a qualidade do concreto, possibilitando assim a identificação do processo correspondente.

As atividades envolvidas na inspeção de uma estrutura podem variar de tarefas simples a investigações mais complexas, dependendo da extensão e da natureza específica do problema em questão (GRANATO, 2002).

Nessa etapa, é de extrema importância assegurar a segurança tanto antes quanto durante o processo de reparo. Portanto, é essencial verificar se há necessidade de utilizar escoras nos elementos de concreto armado. Após concluir a inspeção e mapear as áreas afetadas pela corrosão, inicia-se o plano de trabalho, que envolve a aplicação das técnicas de reparo necessárias.

Antes de qualquer intervenção, é imprescindível adotar todas as medidas de segurança do trabalho conforme estabelecido pela Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977, e garantido pelas Normas Regulamentadoras. Inicialmente, é necessário fornecer todos os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) necessários para a execução do serviço, conforme determinado pela NR 06.

3.2.2 Preparo e delimitação superfície

A qualidade do preparo do substrato é crucial para o sucesso deste processo de reparo ou reforço. Isso significa que o substrato deve apresentar resistência adequada e firmeza para suportar o tratamento (REIS, 2001). Para realizar uma recuperação adequada das áreas com armaduras corroídas, é necessário remover completamente todo o concreto fissurado e com processo de deslocamento, como também o concreto íntegro a até atingir a armadura intacta, não afetada pela corrosão.

Assim é retirado todo o concreto afetado pelo processo de expansão causada pela corrosão, até atingir a armadura íntegra com o uso do ponteiro, expondo a circunferência das barras de aço, deixando toda a sua seção livre para o início do tratamento, como demonstrado na Figura 16. GRANATO (2002) enfatiza a importância de remover o concreto de modo a expor pelo menos 3 cm da armadura não afetada. Esse processo minimiza a troca de polaridade da pilha, entre a região corroída (anódica) e armadura íntegra, evitando o processo de corrosão nas barras próxima reparo.



Figura 16 – Área de reparo após finalização do processo de demolição, com as armaduras expostas.

Fonte: De autoria própria.

Outra etapa fundamental é delimitar a área a ser removida com algum marcador e, posteriormente, realizar cortes com uma serra mármore nas bordas antes do processo de demolição, delimitando claramente a área de intervenção. Isso resulta em polígonos retos, como mostrado na Figura 17, com profundidade uniforme de pelo

menos 2 cm de profundidade no perímetro da área de corte, sendo imprescindível para ancoragem da argamassa de reparo no concreto existente.

Após essa delimitação com a serra, deverá ser removido o concreto na área delimitada com auxílio de ponteiro, utilizando marreta, martetele perfurador ou furadeira de impacto, sendo a escolha muito em função do tamanho e quantidade de áreas a serem tratadas. Esse corte deverá se estender para além do plano das armaduras para que seja possível a limpeza do aço em todo o seu perímetro.

Deverá ser tomado cuidado especial quando esse corte for realizado em elementos estruturais de grande responsabilidade no tocante a estabilidade da estrutura, como pilares com cargas elevadas, como de edifícios altos. Nesses casos, o reparo deverá ser precedido de uma avaliação por meio de um engenheiro calculista, que poderá indicar uma intervenção por etapas para não fragilizar demasiadamente o elemento estrutural.

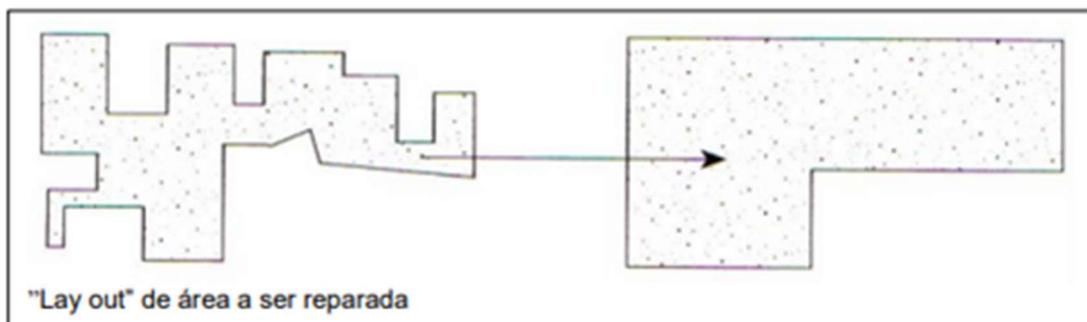


Figura 17 - "Lay out" esperado da área a ser reparada.

Fonte: (GRANATO, 2002).

3.2.3 Limpeza das armaduras

A limpeza adequada das armaduras corroídas é essencial para alcançar resultados positivos, principalmente, se a despassivação for induzido por íons cloretos, pois esses íons quebram a película passivante e se alojam na camada superficial da barra. A reparo com concreto ou argamassa nova irá recompor o ambiente alcalino, a película passivante, tornando o aço novamente passivado. Entretanto, se esses íons não forem removidos satisfatoriamente, é possível que essa

película seja quebrada rapidamente ou nem mesmo seja formada, inutilizando o reparo realizado.

Para o caso de despassivação por carbonatação, a questão é menos problemática, pois haverá pouca incidência de agentes que irá destruir a película, entretanto, a limpeza deverá ser realizada para remoção dos produtos da corrosão que irá prejudicar a aderência da argamassa de reparo com a barra. Portanto, é importante remover completamente todo o produto de corrosão existente sobre a superfície das barras de armadura (RESENDE, 2018).

Para realizar esse procedimento, pode ser utilizado uma escova de aço circular acoplada a uma esmerilhadeira, como pode ser visto na Figura 18, devendo ser escovada toda a armadura até que seja eliminada toda a camada mais espessa do aço oxidado. Em seguida, aplica-se um neutralizador de ferrugem para eliminar os resquícios de oxidação, transformando-os em um fundo preparador que aumenta a aderência do primer aplicado posteriormente.



Figura 18 - Escovação manual das armaduras.

(Fonte: De autoria própria).

É frequente observar que, durante o processo de oxidação, ocorra uma redução na seção transversal das armaduras sem que seja necessária uma complementação direta. Optar por uma área de aço ligeiramente reduzida é muitas vezes mais vantajoso em termos de durabilidade do que adicionar um elemento extra que possa

complicar os trabalhos de recuperação, especialmente em relação à aplicação do material cimentício (SOUZA E RIPPER, 1998).

Portanto, é essencial verificar a área da seção de aço para garantir que a área corroída ($A_{s,corr}$) não ultrapasse 10% da área projetada (A_s), conforme representação da Figura 19. Existem diversas controvérsias em relação a esse valor, uma vez que não é mencionado em nenhuma norma pertinente. Em literaturas como Souza e Ripper (1998) e Emmons (1993), esse limite pode chegar a 15%. No entanto, as grandes empresas de fiscalização de obras optam pelo critério mais rigoroso de 10%.

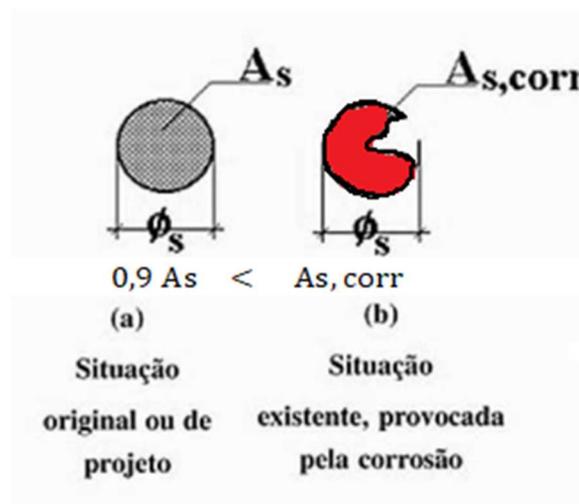


Figura 19 - Representação do $A_{s,corr}$ e A_s .

Fonte: Adaptado de SOUZA E RIPPER, 1998.

Caso $0,9 A_s > A_{s,corr}$, deve ser realizado a complementação da armadura, adicionando novas barras de aço de modo que a área de aço equivalente A_{eq} seja maior que 0,9 da área de aço projetada (A_s). De acordo com Souza e Ripper (1998), deve-se admitir que o trecho de emenda das barras se promova apenas na armadura íntegra. O comprimento da emenda deve ser calculado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023).

Após a análise quantitativa das seções das armaduras, aplica-se, sobre a superfície seca, com um pincel pequeno, conforme Figura 20, uma camada de primer inibidor de corrosão enriquecido com zinco, com uma espessura mínima de 40 micrometros. Esta camada pode ser aplicada em duas demãos, com um intervalo mínimo de 50 minutos entre cada uma, após a homogeneização prévia do produto (GRANATO, 2002), garantindo que toda armadura esteja coberta pelo produto. O

tempo de cura deste material varia conforme as especificações do fabricante, portanto, é essencial seguir as instruções detalhadas no manual de uso do produto.



Figura 20 - Aplicação manual do primer anticorrosivo.

Fonte: De autoria própria.

Concluído o processo de limpeza das armaduras, deve ser respeitado o tempo de cura do primer anticorrosivo. Em paralelo é realizada uma revisão visual detalhada das armaduras, assegurando a completa proteção de todas as barras de aço, para dar continuidade a última etapa do processo, que consiste na reposição do concreto.

3.2.4 Reposição do concreto

De acordo com Resende (2018) para a restauração da seção, é necessário empregar produtos que satisfaçam os seguintes critérios essenciais: capacidade de aderência; módulo de elasticidade adequado ao sistema de reparo; baixa permeabilidade; resistência mecânica compatível com o elemento a ser reparado; resistência suficiente às condições ambientais agressivas; e resistência satisfatória a ataques químicos.

A falta de compatibilidade entre o concreto antigo e o material de reparo pode resultar em falhas precoces no reparo, devido às disparidades no comportamento em resposta a variações térmicas, transmissão de vapor, deformação gradual e retração (Casculo, 1997).

Portanto, a argamassa de reparo pré-fabricada se torna uma escolha ideal para a restauração da área, uma vez que, além de atender a todos os requisitos mencionados anteriormente, oferece uma rápida liberação da estrutura devido à sua capacidade de atingir altas resistências nos primeiros dias.

Outro aspecto crucial a ser assegurado é a espessura adequada da camada de cobertura, pois desempenha um papel fundamental na proteção das armaduras contra os agentes da despassivação, que depende das condições de exposição do concreto. É essencial seguir as diretrizes de cobertura estabelecidas pela NBR 6118, conforme detalhado na Tabela 7.2 (Tabela 3) da norma, que considera fatores como a classe de agressividade ambiental (CAA) e o tipo de elemento de concreto armado.

Como descrito no Item 3.1.6, é comercializado no mercado brasileiro dois tipos de argamassa de reparo amplamente utilizados: a fluída e a tixotrópica. A escolha entre eles dependerá da localização e da dimensão do reparo. É fundamental destacar que os métodos de aplicação desses dois tipos são completamente distintos devido às suas diferentes características de fluidez.

Para executar a técnica com argamassa de reparo fluída, é essencial utilizar fôrmas fabricadas preferencialmente com chapa compensada plastificada, com espessuras superiores a 10 mm, garantindo assim um acabamento e desmolde final de melhor qualidade. Essas fôrmas devem ser instaladas de modo a cobrir toda a área afetada. Para garantir o cobertura adequado, podem ser empregados alguns artifícios, como o uso de espaçadores (Figura 21), comumente chamados de "cocadas", conforme descrito na NBR 14931 (ABNT, 2023). Esses espaçadores podem ser de plástico ou fabricados in loco com argamassa ou concreto, devendo-se atentar para que a proporção água-cimento seja inferior a 0,5. No caso dos espaçadores fabricados in loco, é inserido um fio de arame inserido para fixação na argamassa ainda no estado não endurecido e sua espessura é determinada previamente de acordo com a Tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023), como mencionado anteriormente.



Figura 21 – Espaçador de concreto fixado na armadura.

Fonte: (ENGSETTE, 2024)

Em seguida, procede-se com a fixação e vedação completa da fôrma, deixando apenas uma abertura na parte de cima para a inserção da argamassa de reparo. Caso contrário, o fluido poderá escorrer pelas bordas. Essa vedação pode ser feita utilizando argamassas de rápida secagem, como, as argamassas colantes.

Após a conclusão dessas etapas com precisão, inicia-se o preparo da argamassa de reparo. A quantidade de água é especificada na embalagem pelo fabricante e o material deve ser misturado em betoneiras ou misturadores para garantir a homogeneidade da mistura.

Granato (2002) adverte que em casos de grandes vãos pode ser adicionado até 30% de brita de granulometria até 9 mm para minimizar problemas de retração, sendo uma recomendação dos próprios fabricantes em suas embalagens. Finalmente, argamassa é inserida no local através do espaço previamente deixado durante o processo de vedação da fôrma, conforme Figura 22.

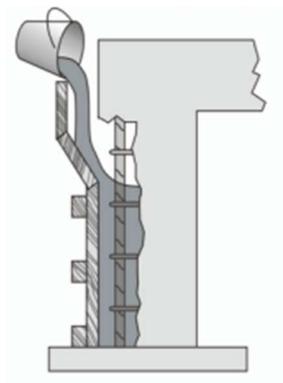


Figura 22 - Reparo com forma, utilizando argamassa de reparo fluida.

Fonte: (GRANATO, 2002).

A retirada da fôrma deve ser realizada somente quando a argamassa de reparo atingir o tempo mínimo recomendado pelo fabricante, comumente esse tempo é de 72 após o preparo, garantindo assim a integridade na fase final da técnica de reparo.

Nos casos em que é utilizada a argamassa de reparo tixotrópica, o processo é simplificado, pois não há necessidade de usar fôrmas, e a maior parte do trabalho é feita durante a aplicação do material. A dosagem de água assim como a fluida é determinado pelo fabricante, pode ser homogeneizado com uso de misturador de ação forçada tipo betoneira ou misturador em caso de grandes volumes, ou, utilizando um misturador de baixa rotação em um recipiente adequado.

É crucial que, ao realizar reparos em superfícies verticais ou na face inferior do elemento de concreto, é necessário aplicar a argamassa de reparo tixotrópica em camadas, conforme as instruções fornecidas pelo fabricante do produto. Para superfícies horizontais, como o topo de lajes ou vigas, esses produtos geralmente permitem a aplicação em uma única camada (RESENDE, 2018). A técnica de aplicação manual da argamassa cimentícia em consistência seca, ou seja, com baixo teor de água é denominada de Dry Pack (Figura 23).

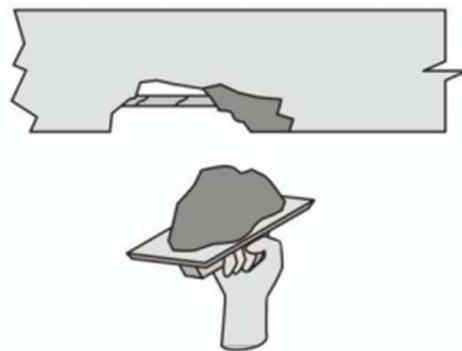


Figura 23 - Aplicação de argamassa polimérica tixotrópica.

Fonte: (GRANATO, 2002)

3.3 Fluxograma de execução

Pode-se notar que a descrição da técnica acima segue uma sequência cronológica de execução para facilitar seu desenvolvimento. Para uma melhor compreensão, foi desenvolvido um fluxograma (Figura 24), na qual descreve todas as etapas e análises envolvidas na técnica de reparo de armaduras com corrosão em elementos de concreto armado.

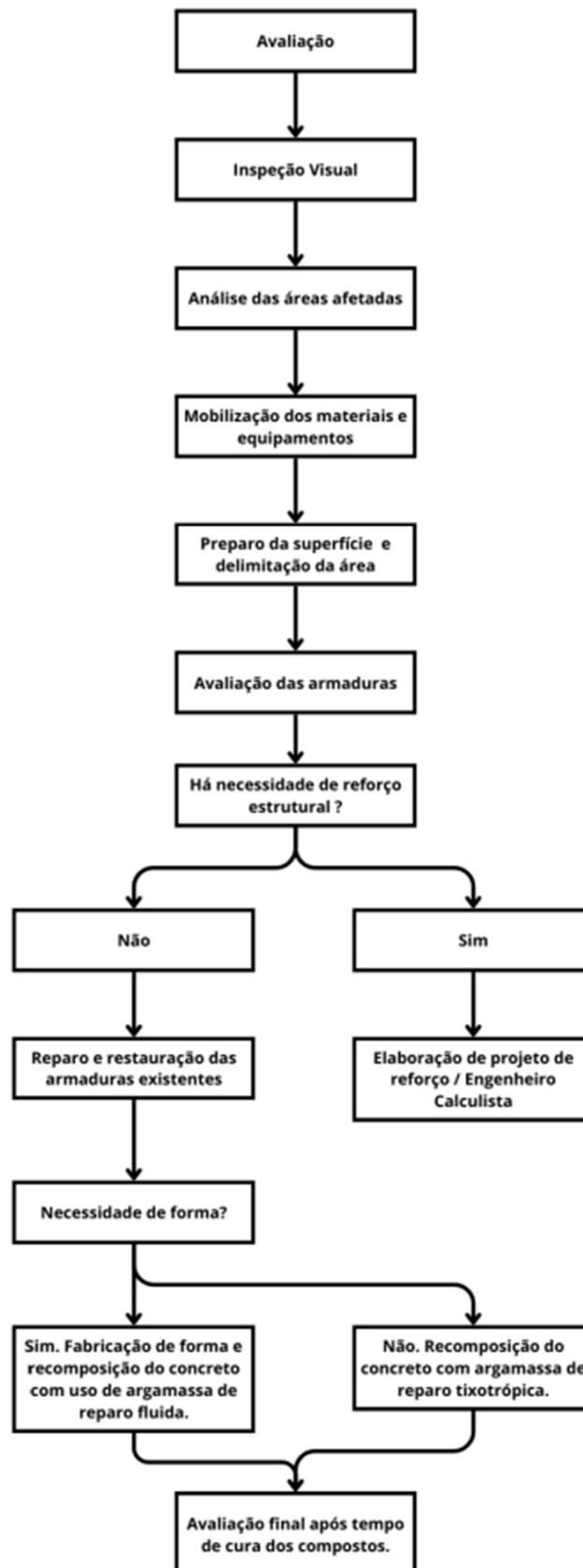


Figura 24 - Fluxograma de execução das técnicas de reparo.
Fonte: De autoria própria.

3.4 Intervenção em casos especiais

O surgimento do fenômeno de corrosão das armaduras não está limitado apenas a locais de fácil acesso, por exemplo, pode ser frequentemente encontrado em fachadas de edifícios, fossos de elevador e tetos de caixas d'água. Para esses casos, é fundamental adotar todas as medidas de segurança necessárias para a execução do serviço, não se limitando apenas aos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) básicos. É essencial considerar as normas regulamentadoras pertinentes, como a NR 35, que trata do trabalho em altura, e a NR 33, que aborda a segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados.

Portanto, é evidente que em certos casos, os responsáveis técnicos devem possuir conhecimento e compreensão de outras áreas da engenharia, a fim de empregar a técnica de reparo com competência e garantir a integridade material e a segurança dos trabalhadores.

4 ESTUDO DE CASO

O presente estudo foi conduzido por meio de inspeções visuais em um prédio residencial cuja estrutura é em concreto armado. Esta edificação, inaugurada na década de 80, está situada em Casa Amarela, zona norte do Recife/PE. Atualmente, o edifício está passando por um processo de reforma, com foco na revitalização da fachada, incluindo a substituição de todo o revestimento cerâmico.

Durante o processo de demolição do revestimento cerâmico, começaram a surgir áreas com corrosão das armaduras nos elementos estruturais na fachada do edifício, assim, foi comunicado ao corpo técnico da empresa para ser realizado uma inspeção.

Para realização desse estudo de caso, foi essencial a utilização de um andaime suspenso com altura de 3 metros, mostrado na Figura 25, especialmente porque um dos reparos em análise exigia intervenção na fachada do edifício. Portanto, a utilização de equipamentos auxiliares se mostra de suma importância e deve ser devidamente considerada durante a fase de planejamento do serviço. A ausência desses equipamentos pode impactar diretamente na viabilidade e na qualidade do reparo.



Figura 25 - Andaime suspenso de 3 metros no local do reparo.

Fonte: De autoria própria.

4.1 Inspeção

Com a autorização da empresa executora e sob a supervisão do engenheiro responsável pela obra, iniciou-se a inspeção das fachadas. Após uma revisão visual da estrutura, foram identificados vários pontos com o concreto fissurado e destacado e com armadura exposta e corroída, conforme demonstram a Figura 26 e Figura 27.



Figura 26 - Fissuras verticais e horizontais no emboço do caixão da escada.

Fonte: De autoria própria.



Figura 27 - Locais com concreto desagregado e armaduras expostas.
Fonte: De autoria própria.

Após realizar a identificação dos pontos, foi realizado a demolição do emboço que apresentava fissuras (Figura 28), para realização de uma análise mais precisa.

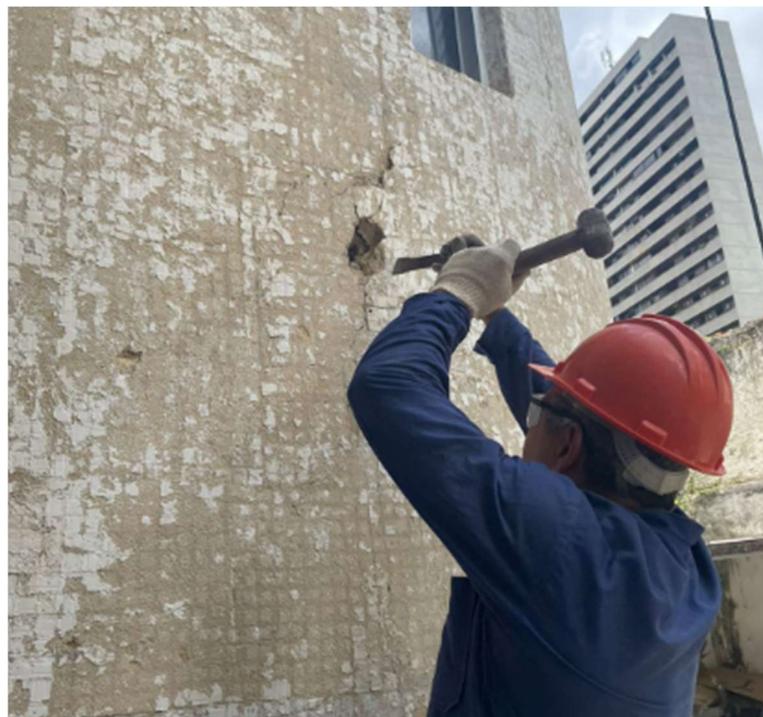


Figura 28 - Profissional realizando a demolição do emboço.
Fonte: De autoria própria.

Logo no início do processo de demolição do emboço, detectou-se um ponto com armadura exposta, possibilitando assim a conclusão do processo de identificação da corrosão (Figura 29).



Figura 29 - Ponto de corrosão encontrado após demolição do emboço.

Fonte: De autoria própria.

Diante da extensão e da grande quantidade de pontos de corrosão, foram selecionados dois locais para serem acompanhados e fornecerem todo o processo executivo de recuperação para este trabalho. A escolha dos locais não foi aleatória; visou exemplificar as duas principais formas de reposição do concreto deteriorado. Assim, um ponto foi selecionado para demonstrar o reparo com o uso de forma, enquanto o outro será tratado sem esse recurso.

Ainda nessa etapa foi analisado a necessidade de escoramento, na qual foi descartado, pois nenhum dos casos ofereciam grandes riscos a estrutura, necessitando apenas do processo de recuperação.

Outro fato relevante, foi a identificação de pontos onde já teriam passados pelo processo de recuperação (Figura 30), na qual apresentava armaduras com aplicação do primer anticorrosivo e resquícios de argamassa de reparo. Essa intervenção anterior foi confirmada pelos representantes do condomínio, sendo dita que a mesma teria sido realizada há menos de 5 anos, prazo menor que a média da garantia ofertada por empresas que executam esse serviço.



Figura 30 - Locais que já haviam passado pelo processo de reparo estrutural.

Fonte: De autoria própria.

Os pontos em questão, foram analisados e foram constatadas falhas no processo executivo, uma vez que a argamassa de reparo estava se desprendendo, pela falta de aderência com o concreto antigo, evidenciado pela não delimitação do local assim como a aplicação em locais angulosos com profundidade menor que 01 centímetro (Figura 31).



Figura 31 - Medição da argamassa de reparo com uso do paquímetro.

Fonte: De autoria própria.

4.2 Reparo

Para dar início ao processo de recuperação, primeiramente foi analisada a acessibilidade ao local, uma vez que um dos pontos selecionados estava localizado em uma altura considerável em relação ao solo. Para superar esse obstáculo, optou-se pelo uso de um andaime suspenso de 3 metros, o qual foi ancorado, conforme os projetos fornecidos pelo engenheiro mecânico e pelo técnico de segurança do trabalho da empresa responsável pela execução.

Após concluir a ancoragem dos equipamentos e fornecer todos os EPIs necessários aos profissionais encarregados da execução, deu-se início à remoção de todo o concreto deteriorado dos pontos selecionados. Este processo foi realizado utilizando um ponteiro de aço acoplado a uma furadeira de impacto (Figura 32), garantindo o cumprimento das exigências mencionadas no Item 3.3.1, que incluem:

- Assegurar que toda a seção da armadura afetada pela corrosão fique exposta;
- Expor pelo menos 3 centímetros da armadura íntegra (Figura 33);
- Garantir que em toda a área de atuação do reparo haja pelo menos 1 centímetro de profundidade.



Figura 32 - Remoção do concreto deteriorado.

Fonte: De autoria própria.



Figura 33 - Medição do comprimento da armadura íntegra.

Fonte: De autoria própria.

Com a finalização da etapa anterior, deu-se início à delimitação da área de intervenção utilizando uma serra mármore e um disco apropriado para cortes em concreto (Figura 34). Essa etapa é de extrema importância para garantir a ancoragem da argamassa de reparo com o concreto existente.



Figura 34 - Delimitação da superfície.

Fonte: De autoria própria.

O processo de reparo prosseguiu com a restauração das armaduras. A escovação das armaduras, utilizando uma escova circular com cerdas de aço acoplada a uma esmerilhadeira (Figura 35), garantiu a remoção dos resíduos maiores resultantes da corrosão, já as particulares menores foram eliminadas através do uso do removedor de ferrugem e fosfatizante, convertendo toda essa fuligem em um fundo preparador.



Figura 35 - Escovação do aço com uso de escova circular.

Fonte: De autoria própria.

Após concluir o processo de limpeza das armaduras, foi possível realizar a verificação das suas bitolas para calcular a área da seção de aço resistente (Figura 36), respeitando a limitação de perda de até 10%.

Para o exemplo em questão, a barra em análise possui um diâmetro de 16 mm e, durante a verificação, constatou-se que o diâmetro da barra era de 15,3 mm. Com base em cálculos prévios realizados, o diâmetro mínimo que a barra poderia apresentar era de 15,2 mm, respeitando a perda máxima de área de 10%. Portanto, não foi necessário aumentar a área de aço, e o processo de reparo pôde prosseguir sem a necessidade de reforço estrutural.



Figura 36 - Verificação das bitolas das barras de aço com paquímetro.

Fonte: De autoria própria.

Na análise visual das armaduras realizada previamente, foi notada a necessidade de substituir os estribos devido à sua ausência em alguns pontos, resultado do alto grau de corrosão, conforme Figura 37. Os estribos são particularmente vulneráveis aos efeitos da corrosão devido às suas dimensões menores em comparação com outras barras. No entanto, as outras barras nos dois locais estudados não apresentaram perda significativa, atendendo ao requisito da perda máxima permitida.



Figura 37 - Identificação dos estribos deteriorados.

Fonte: De autoria própria.

O processo de reposição dos estribos consistiu na remoção da armadura afetada, após verificação do espaçamento, foram realizados furos com a utilização de furadeira com broca de diâmetro-padrão acima do diâmetro da barra, lembrando que esse processo seguiu os parâmetros de ancoragem estabelecidos pela NBR 6118. Realizada as devidas medições na área de recomposição, foram confeccionados novos estribos. Para fixação das novas barras, foi utilizado o adesivo estrutural a base de epóxi, que teve sua mistura realizada de acordo com as orientações e manual de fábrica.

Visando a melhor eficiência do produto, foi realizada a preparação do substrato dos furos, sendo executada a limpeza com jato de água para eliminação da poeira resultante do processo de sua execução, garantindo assim a aderência do adesivo com o concreto existente. A fixação consiste em aplicar o adesivo em toda a superfície

da barra a ser ancorada, logo após realização da mistura dos componentes, não excedendo o tempo de 50 minutos, como especificado por fabricante (Figura 38).



Figura 38 - Ancoragem dos estribos finalizada.

Fonte: De autoria própria.

Em seguida foi executado a aplicação do primer anticorrosivo em todas as superfícies de armadura aparente na área de atuação do reparo. A execução se deu com uso de uma trincha pequena, aplicando em duas demãos do produto, com intervalo de 3 horas entre elas, conforme orientação do fabricante.

4.2.1 *Reparo com argamassa tixotrópica*

Respeitado o tempo de cura dos materiais utilizados, foi então iniciado no dia seguinte o reparo no caso sem forma, com a utilização da argamassa de reparo tixotrópica, sendo executada por camadas, através do chapeamento com utilização de colher de pedreiro. Vale ressaltar que essas camadas foram executadas até atingir o cobrimento adequado de 30 mm delimitado pela utilização dos espaçadores (Figura 39).



Figura 39 - Reposição do final do concreto, com acabamento com desempoladeira.

Fonte: De autoria própria.

Para mistura das argamassas de reparo foi utilizado um misturador manual de baixa rotação, uma vez que o reparo exigia uma quantidade reduzida do composto (Figura 40).



Figura 40 - Processo de mistura da argamassa de reparo tixotrópica.

Fonte: De autoria própria.

4.2.2 *Reparo com argamassa fluida*

Por outro lado, no caso de reparo com argamassa de reparo fluida, foram fixados nas armaduras, os espaçadores fabricados in loco pela empresa, na qual foi possível então realizar a instalação da forma fabricada com chapa compensada plastificada de 10mm (Figura 41). A forma foi fixada e vedada com argamassa colante tipo II, valendo ressaltar ainda, o espaço deixado para realizar a introdução da argamassa fluida de reparo. Esse espaço deve ser no ponto mais elevado, garantindo que todo o volume de reparo seja preenchido.

Com a finalização de todos esses procedimentos, foi possível então realizar a recomposição da estrutura, com a argamassa de reparo fluida.



Figura 41 - Espaçadores e formas instalados no caso de reparo com argamassa fluida.

Fonte: De autoria própria.

Concluindo todas as etapas do processo, foi então aguardado o tempo de cura do composto cimentício, de 72 horas, para retirada da forma, possibilitando a análise da área recuperada (Figura 42), verificando o acabamento e presença de “bicheiras”, que são espaços mal concretados. Em caso de presença dessa manifestação patológica deve ser realizado um corte com aprofundamento de pelo menos 2 cm, realizando um preenchimento com argamassa de reparo tixotrópica, como demonstrado no outro reparo.



Figura 42 - Resultado final do reparo após retirada da forma.

Fonte: De autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar o desenvolvimento de técnicas de recuperação estrutural em elementos de concreto armado afetados pelo processo de corrosão. O estudo abrangeu todo o processo executivo, desde a identificação da manifestação do fenômeno de corrosão e seleção dos materiais até a conclusão das técnicas de reparo. Além disso, foram abordadas as medidas necessárias para locais com acesso especial.

5.1 Conclusões

Conforme mencionado nos primeiros tópicos deste trabalho, o processo de corrosão afeta uma grande parte das construções em concreto armado em todo o mundo. Portanto, medidas de inspeção e manutenção são de suma importância para garantir a longevidade das estruturas. Diante disso, o presente trabalho destacou a importância de cada etapa do processo executivo das técnicas de reparo, através do estudo de caso, na qual foi executado com sucesso.

A importância de garantir a execução correta das técnicas ficou amplamente evidente durante o processo de inspeção e identificação da manifestação patológica

do estudo de caso em questão. Foi observado que o edifício já havia passado por um processo de recuperação estrutural em alguns elementos, porém, esses elementos apresentavam falhas na execução do processo. Notou-se que a preparação da superfície e a delimitação da área de reparo não foram realizadas adequadamente, o que resultou na falta de aderência entre o concreto antigo e a argamassa de reparo. Como resultado, ocorreram descolamentos em vários pontos, conforme evidenciado no estudo de caso.

A ausência de normas pertinentes que proporcionam uma diretriz para execução e garantia da eficiência dos materiais empregados, é um grande desafio para o desenvolvimento do processo de execução. Uma vez que, apesar das literaturas apresentarem linha de execução semelhante das técnicas empregadas, são apresentadas divergências decisivas para sua execução, como, o conflito em algumas etapas do processo, padronização dos materiais utilizados e divergências quanto o conceito de reforço e reparo.

Assim, a supervisão técnica do profissional de engenharia responsável é fundamental para assegurar o desenvolvimento correto das técnicas existentes. Além de garantir a execução correta, o engenheiro também deve abordar a causa raiz que levou a estrutura ao processo de corrosão. É importante ressaltar que, embora a recuperação devolva a integridade e a vida útil da estrutura, não elimina completamente a possibilidade de ocorrência futura dessa manifestação patológica.

Dessa maneira este trabalho se torna uma ferramenta de grande relevância no que diz respeito à recuperação de elementos afetados pela corrosão. Todas as metodologias apresentadas são postas em prática por meio do desenvolvimento do estudo de caso, demonstrando como devem ser aplicadas na realidade do campo profissional de atuação. Esta obra serve como uma cartilha técnica de execução, que pode ser facilmente compreendida pelos profissionais da área.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para avançar ainda mais e alcançar soluções mais eficazes e resultados aprimorados no reparo de elementos de concreto armado impactados pela corrosão, é fundamental realizar uma pesquisa mais abrangente nesse domínio.

A seguir, alguns tópicos que podem ser abordados com o intuito descrito acima:

- Validação dos primers anticorrosivo quanto a sua eficiência dentro da execução da técnica de reparo;
- Comportamento das técnicas elencadas em grandes estruturas de concreto, como, estádios, pontes e fundações;
- Estudo sobre a durabilidade dos materiais empregados;
- Desenvolvimento de novos métodos de reparo com uso de aditivos impermeabilizantes, de grande relevância para regiões chuvosas;

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- AGUIAR, J. E. **Metodologia de Diagnósticos de Patologias**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**. 1994. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro; 2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT. NBR 5674**: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto armado – procedimento. Rio de Janeiro; 2023.
- Brasil. **Lei nº 6.514**, de 22 de dezembro de 1977. Dispõe sobre a segurança e medicina do trabalho e dá outras providências. Brasília, 1977.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988.
- CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. Pini. São Paulo. 1997.
- CORREIA, M.J; SALTA, M; BENNANI, A; GONZALEZ, J.A. **Corrosion behavior of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 37, p.1463-1471, 2007.

EMMONS, P. H. **Concrete Repair and Maintenance Illustrated**. Chicago: McGraw-Hill, 1993.

ENGERAL. (s.d.). **Recuperação e Tratamento Estrutural**. Recuperado de <https://engeral.com.br/recuperacao-tratamento-estrutural/>. Acessado em 20/02/2024.

ENGSETTE. (s.d.). Cocada. Recuperado de <https://engsette.com.br/cocada/>. Acessado em 25/02/2024.

FERREIRA COSTA. (s.d.). **Removedor de Ferrugem e Fosfatizante 250ml - Allchem**. Recuperado de https://www.ferreiracosta.com/produto/163046/removedor-de-ferrugem-e-fosfatizante-250ml-allchem?region_id=222222&gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMInc-774fChQMVn0VIAB20zAS9EAQYASABEglAufD_BwE. Acessado em 05/02/2024.

FERREIRA COSTA. (s.d.). **Primer Anticorrosivo Armatec Zn 0,9L - Vedacit**. Recuperado de https://www.ferreiracosta.com/produto/108593/primer-anticorrosivo-armatec-zn-0,9l-vedacit?region_id=222222. Acessado em 05/02/2024.

FERREIRA COSTA. (s.d.). **Adesivo Estrutural à Base de Epóxi Compound 1kg - Vedacit**. Recuperado de https://www.ferreiracosta.com/produto/15596/adesivo-estrutural-a-base-de-epoxi-compound-1kg-vedacit?region_id=222222. Acessado em 05/02/2024.

GARCÍA-ALONSO, M. C., Escudero, M. L., Miranda, J. M., Vega, M. I., Capilla, F., Correia, M. J., Salta, M., Bennani, A., & González, J. A. (2007). **Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete**. *Cement and Concrete Research*, 37(10), 1463-1471.

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

GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 174 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GRANATO, J. E. **Patologia das construções**. São Paulo: [s.n.], 2002.

HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese de Livre docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. **Vida útil de estrutura de concreto.** In: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, VI, Porto Alegre, 1997. Anais... Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

_____, P., Andrade, J. J. O., & Medeiros, M. H. F. de. (2011). Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In G. C. Isaia (Ed.), *Concreto: Ciência e Tecnologia* (Cap. 22). IBRACON.

LI, L. & SAGUÉS, A.A. **Chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions** – Open-circuit immersion tests. *Corrosion*, v. 57, n. 1, p. 19–28, 2001.

LOJAS TAMOYO. (s.d.). **Talhadeira 10" Chata - Paraboni.** Recuperado de <https://www.lojastamoyo.com.br/produto/talhadeira-10-chata-101644-paraboni-93094> Acessado em 03/03/2024.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Norma Regulamentadora 06:** Equipamento de Proteção Individual (EPI). Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Brasília, 1978.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Norma Regulamentadora 33:** Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Norma Regulamentadora 35:** Trabalho em Altura. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Brasília, 2012.

MTX. (s.d.). **Escova Para Esmirilhadeira com Furo 100 mm x 16 mm.** Amazon. Recuperado de <https://www.amazon.com.br/MTX-Escova-Para-Esmirilhadeira-Furo/dp/B09F7W7B3T>. Acessado em 25/02/2024.

NAKAMURA, J. **Reparo, reforço e recuperação do concreto:** Variedades de técnicas para reparo, reforço e recuperação permite solucionar a maior parte das manifestações patológicas, mas tudo depende de um bom diagnóstico. *Revista Técnica, Edificação* 146, Maio 2009.

NEVES, Moisés Balenga José; VÁZQUEZ, Elaine Garrido. **Patologias das estruturas.** BOLETIM DO GERENCIAMENTO REVISTA ELETRÔNICA, Politécnica UFRJ, 23/09/2020.

NOVAES, Isabella M. M; POZNYAKOV, Karolina. **Patologia sem Estruturas de Concreto Armado.** BOLETIM DO GERENCIAMENTO REVISTA ELETRÔNICA, Politécnica UFRJ, 15/10/2020.

PEREIRA, Fernanda. **TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. Projeto final, (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Federal Fluminense, 2017.

POLITO, Giuliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. TCC - Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

REIS, L. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RESENDE, G. A. **Recuperação de Estruturas de Concreto Armado: Técnicas e Materiais para Prolongar a Vida Útil**. 6ª CONFERÊNCIA SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS - PATORREB. Rio de Janeiro, 2018.

RESSEG DISTRIBUIDORA. (s.d.). **Ponteiro para Martetele Tex 30/40 - 30x500mm**. Recuperado de <https://www.ressegdistribuidora.com.br/ponteiro-para-martetele-tex-3040-30x500mm-9104/p>. Acessado em 27/02/2024.

SANTOS, C. F. dos. **Patologia de estruturas de concreto armado**. 2014. 91 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria.

SILVEIRA, Lília. **SOBRE A RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 12/04/2021.

SOUZA, M. I.; MURTA, M. M. **Patologias, recuperação e reforço estrutural em concreto armado**. 2012. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, Caratinga.

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