

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO MARIO AMARAL

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO COM REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO**

CAMPO MOURÃO

2023

JOÃO MARIO AMARAL

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO COM REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO**

**Analysis of the reconsition process in reinforced concrete beams with carbon
fiber reinforcement**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco

Coorientadora: Prof. Dr.^a Thelma Pretel Brandão Vecchi

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO MARIO AMARAL

**ANÁLISE DO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO COM REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21 de novembro de 2023

Douglas Fukunaga Surco
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ronaldo Rigobello
Doutor em Engenharia de Estruturas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiana Goia Rosa de Oliveira
Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar saúde e iluminar meu caminho. A realização desse trabalho só foi possível devido a ajuda de algumas pessoas.

Agradeço primeiramente a minha mãe Ana Maria do Amaral por todo suporte para que eu pudesse chegar até aqui.

A minha namorada Helen Caroline Olivotto Harthmann, por todo apoio durante esses anos.

Aos colegas que me ajudaram durante esses anos de graduação.

Em seguida a toda minha família, por acreditar e me incentivar a não desistir.

Por fim, agradeço ao meu orientador Douglas Fukunaga Surco, pelo conhecimento compartilhado. A minha coorientadora Thelma Pretel Brandão Vecchi, pelo empenho em tornar esse trabalho melhor. Ao mestre de obras António Alves, que me ajudou na elaboração dos corpos de prova. Aos técnicos de Laboratório Fábio Rodrigo Kruger, Fernando Roberto dos Santos e ao professor Jorge Luís Nunes de Góes, que me ajudaram na realização do experimento. Aos professores Fabiana Goia de Oliveira e Ronaldo Rigobello, por aceitarem avaliar esse trabalho. Também agradeço a todos professores da UTFPR que compartilharam seu conhecimento ao longo do curso por meio das aulas.

RESUMO

As estruturas de concreto armado podem sofrer patologias durante sua via útil, devido a falhas de projeto, execução inadequada da obra, uso incorreto entre outros motivos. Entre as patologias, a mais ocorrente em obra é a corrosão de armaduras. Caso isto ocorra, medidas para recuperar a estrutura danificada devem ser executadas. Para recuperação do elemento estrutural a técnica mais utilizada é o tratamento da armadura e posterior reparo do elemento estrutural e quando necessário também deve-se fazer o reforço. O seguinte trabalho apresenta um estudo com o objetivo de avaliar o processo de recomposição de elementos estruturais em concreto armado, assim como o desempenho dos materiais: concreto, graute e adesivo estrutural na recomposição de vigas. Também será testado a efetividade da fibra de carbono como reforço estrutural. Para realizar as análises, serão feitos ensaios no laboratório em vigas de concreto armado, divididos em grupos, onde cada grupo utiliza um tipo de material ou processo diferente. Após as análises, serão realizadas conclusões sobre cada material.

Palavras-chave: reparo estrutural; graute; adesivo estrutural; fibra de carbono.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures can suffer pathologies during their useful life, due to design flaws, inadequate execution of the work, incorrect use, among other reasons. Among the pathologies, the most common on site is reinforcement corrosion. With this occurrence, measures to recover the damaged structure must be executed. For the recovery of the structural element, the most used technique is the treatment of the reinforcement and subsequent repair of the structural element and, when necessary, reinforcement should also be made. The following work presents a study with the objective of evaluating the process of recomposition of structural elements in reinforced concrete, as well as the performance of the materials: concrete, grout and structural adhesive in the recomposition of beams. The effectiveness of carbon fiber as a structural reinforcement will also be tested. To carry out the analyses, tests will be carried out in the laboratory on reinforced concrete beams, divided into groups, where each group uses a different type of material or process. After the analyses, conclusions will be made about each material.

Keywords: structural repair; grout; structural adhesive; carbon fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Deterioração da corrosão das Armaduras | 16 |
| Figura 2 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal..... | 18 |
| Figura 3 - Representação esquemática do processo de carbonatação | 19 |
| Figura 4 - Remoção do concreto com uso de marreta e talhadeira | 22 |
| Figura 5 - Fluxograma de preparo do substrato | 24 |
| Figura 6 - Remoção de produtos da corrosão com escovas de cerdas de aço. | 25 |
| Figura 7 - Remoção de produtos da corrosão com lixa manual | 26 |
| Figura 8 - Remoção de produtos da corrosão com lixadeira elétrica..... | 26 |
| Figura 9 - Fluxograma de limpeza..... | 28 |
| Figura 10 - Armaduras com pintura epóxi, com e sem corrosão | 30 |
| Figura 11 - Fluxograma do processo de tratamento da armadura..... | 31 |
| Figura 12 - Tipos de fôrmas para recomposição | 33 |
| Figura 13 - Fluxograma da recomposição..... | 34 |
| Figura 14 - Adesivo epóxi em pasta e fluido | 35 |
| Figura 15 - Grauteamento de um pilar e um equipamento | 36 |
| Figura 16 - Reforço com chapas metálicas coladas e chumbadas..... | 38 |
| Figura 17 - Reforço por adição de chapas metálicas | 38 |
| Figura 18 - Sistema composto estruturado com fibras de carbono | 40 |
| Figura 19 - Fibra de carbono versus reforços convencionais..... | 41 |
| Figura 20 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono | 43 |
| Figura 21 - Caracterização dos grupos de vigas | 44 |
| Figura 22 - Fôrmas para elaboração das vigas..... | 46 |
| Figura 23 - Elaboração dos ganchos | 47 |
| Figura 24 - Elaboração das armaduras | 47 |
| Figura 25 - Armaduras prontas com espaço para recomposição..... | 48 |
| Figura 26 - Fôrmas prontas para concretagem | 49 |
| Figura 27 - Fôrmas concretadas | 50 |
| Figura 28 - Vigas cobertas com lona | 50 |
| Figura 29 - Vigas recompostas | 51 |
| Figura 30 - Aplicação da resina epóxi nas vigas | 52 |
| Figura 31 - Aplicação do rolo tira bolhas sobre a manta de carbono..... | 53 |
| Figura 32 - Aplicação da resina epóxi sobre a manta de fibra carbono | 53 |
| Figura 33 - Vigas reforçadas com manta de fibra de carbono | 54 |
| Figura 34 - Corpos-de-prova de concreto | 55 |
| Figura 35 - Corpos-de-prova de graute | 55 |
| Figura 36 - Ensaio de compressão | 56 |
| Figura 37 - Esquema do ensaio de tração por flexão..... | 57 |
| Figura 38 - Ensaio de uma viga..... | 57 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 39 - Valores de Ψ_6 | 59 |
| Figura 40 - Corpos-de-prova de concreto rompidos | 60 |
| Figura 41 - Corpos-de-prova de graute rompidos | 60 |
| Figura 42 - Gráfico de força máxima | 62 |
| Figura 43 - Vigas do grupo A, rompidas..... | 63 |
| Figura 44 - Vigas do grupo B, rompidas..... | 64 |
| Figura 45 - Vigas do grupo C, rompidas..... | 64 |
| Figura 46 - Vigas do grupo D, rompidas..... | 65 |
| Figura 47 - Vigas do grupo E, rompidas..... | 65 |
| Figura 48 - Lado inferior das vigas do grupo E rompidas | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 - Resistência à compressão do concreto e graute..... | 58 |
| Tabela 2 - Resultados do ensaio de flexão das vigas | 61 |
| Tabela 3 - Locais de ruptura das vigas | 62 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 | Objetivo Geral | 12 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 12 |
| 3 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 4.1 | Corrosão de armaduras | 15 |
| 4.1.1 | Corrosão eletroquímica | 17 |
| 4.1.2 | Carbonatação do concreto | 18 |
| 4.1.3 | Ação de cloretos..... | 20 |
| 4.1.4 | Ação de ácidos | 20 |
| 4.2 | Recuperação de elementos de concreto armado | 21 |
| 4.2.1 | Preparo do substrato | 22 |
| 4.2.2 | Limpeza | 25 |
| 4.2.3 | Tratamento da patologia..... | 29 |
| 4.2.4 | Recomposição da estrutura..... | 31 |
| 4.3 | Adesivos estruturais | 35 |
| 4.4 | Graute | 36 |
| 4.5 | Reforço das estruturas de concreto armado | 37 |
| 4.5.1 | Reforço por adição de chapas e perfis metálicos | 37 |
| 4.5.2 | Reforço com fibras de carbono..... | 39 |
| <u>4.5.2.1</u> | <u> Materiais e propriedades</u> | <u>41</u> |
| <u>4.5.2.2</u> | <u> Técnica de aplicação</u> | <u>42</u> |
| 5 | METODOLOGIA | 44 |
| 5.1 | Materiais utilizados | 45 |
| 5.2 | Elaboração das vigas | 46 |
| 5.3 | Recomposição das vigas | 51 |
| 5.4 | Aplicação da manta de carbono | 52 |
| 5.5 | Ensaio de compressão dos corpos-de-prova | 54 |
| 5.6 | Ensaio de tração por flexão das vigas | 56 |
| 6 | RESULTADOS | 58 |
| 6.1 | Resistência a compressão do concreto e graute (fc) | 58 |
| 6.2 | Resistência a flexão | 61 |

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 7 | CONCLUSÃO | 67 |
| | REFERÊNCIAS..... | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização o ser humano preocupa-se com a construção de estruturas adequadas às suas necessidades, sejam elas na parte de habitação, laboral ou de infra-estrutura. Dessa forma reuniu-se um grande acervo científico ao longo dos anos, que conduziu o desenvolvimento da tecnologia da construção civil que engloba a elaboração, o cálculo, a análise e o detalhamento estrutural, a tecnologia dos materiais e as técnicas construtivas (Souza; Ripper, 1998).

O concreto é uma mistura de água, cimento, agregado graúdo e miúdo (pedra e areia). O cimento é um material de custo elevado, assim o objetivo principal da utilização dos agregados de maiores dimensões é, reduzir o custo do concreto sem afetar a qualidade (Carvalho; Filho, 2012).

Como elemento estrutural o concreto sozinho não é adequado, pois tem boa resistência à compressão e muito fraca a tração (cerca de 1/10 da resistência à compressão), e esse tipo de solicitação está presente na maioria das vezes em estruturas de construções usuais (Carvalho; Filho, 2012).

Para aumentar a resistência das estruturas em concreto é necessário unir o concreto a um material com boa resistência a tração e seja mais deformável, o material mais comum designado para essa função é o aço, que necessita ser colocado longitudinalmente na região tracionada da peça. Dessa forma ambos materiais deverão trabalhar solidariamente devido a aderência entre a superfície do aço e do concreto. No concreto armado, o concreto e a armadura funcionam em conjunto pela aderência e a possibilidade de ocorrência de regiões fissuradas de concreto (Carvalho; Filho, 2012).

De modo geral, as estruturas de concreto armado apresentam uma vida útil longa, porém alguns fatores como, o aumento do nível de solicitações, o envelhecimento natural e a deterioração pela ação de agentes agressivos alteram a vida útil considerada no projeto inicial, tornando necessária a ocorrência de manutenção, reparos e recuperações em estruturas de concreto armado (Beber, 2003).

O surgimento de problema patológico em uma estrutura, aponta a existência de uma ou mais falhas, no decorrer da execução de uma das etapas da construção, assim como falhas no sistema de controle de qualidade de uma ou mais atividades (Souza; Ripper, 1998).

Ao analisar uma estrutura de concreto “doente” é extremamente necessário compreender o motivo do surgimento e desenvolvimento da “doença”, procurando elucidar as causas, antes da prescrição e aplicação do “remédio” necessário. É indispensável o conhecimento das origens da deterioração, para que se consiga proceder os reparos necessários e também a estrutura não volte a se deteriorar (Souza; Ripper, 1998).

Os serviços de reforço necessitam sempre uma elaboração precedente de trabalhos de cálculo estrutural, sejam na modificação ou na funcionalidade da estrutura, por exemplo o aumento da carga da utilização, ou como consequência de danificação ocorrido na estrutura, nesse caso o reforço estará introduzido nos trabalhos de recuperação. Existem vários recursos disponíveis quando se trata de materiais e intervenções usualmente utilizadas, para realização de serviços de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado (Souza; Ripper, 1998).

Esse trabalho tem como intuito, analisar a técnica de recomposição em vigas de concreto armado, com os seguintes materiais: concreto, graute e adesivo estrutural, assim como a efetividade da fibra de carbono como reforço estrutural. Os ensaios foram realizados no laboratório de sistemas estruturais e no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Campo Mourão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a eficiência da recomposição do concreto armado em vigas, utilizando concreto, graute, adesivo estrutural, e o reforço estrutural utilizando manta de fibra de carbono.

2..2 Objetivos específicos

- Estudar os métodos de reparo estrutural executados comumente em obra.
- Avaliar o uso de concreto, graute, adesivo estrutural no reparo de vigas de concreto armado.
- Analisar a eficiência da fibra de carbono como reforço estrutural em vigas de concreto armado reparados com graute e adesivo estrutural.

3 JUSTIFICATIVA

Os elementos estruturais de concreto armado, como qualquer outro material utilizado na construção civil, a partir de sua concepção têm uma vida útil média estimada de acordo com sua finalidade e sua utilização. A vida útil é alcançada e até prolongada desde que a estrutura receba uma manutenção preventiva. Mas a mesma pode ser drasticamente reduzida se a estrutura não tiver uma concepção estrutural adequada, defeitos construtivos, e de utilização de acordo com as cargas para qual o elemento foi dimensionado (Machado, 2002).

O envelhecimento e a degeneração do concreto são processos naturais e inevitáveis. A maior preocupação não é o acontecimento da degeneração, mas sim, como esse processo desenvolve-se e as causas de sua evolução. Os materiais, componentes e elementos utilizados na construção civil, interagem com o ambiente que apresenta agentes agressivos com diferentes níveis de agressividade (Beber, 2003).

O objetivo principal da patologia das estruturas é obter explicações técnicas e científicas para os defeitos encontrados no comportamento das estruturas, seja no decorrer da sua construção, ou em sua fase de serviço, para determinar a origem e as possíveis consequências em relação a segurança e à confiabilidade da obra, possibilitando que se tome uma decisão correta e segura quanto a utilização posterior das estruturas em análise e definir se há necessidade de demolição ou recuperação e reforço do elemento estrutural danificado (Machado, 2002).

A manifestação patológica de grande gravidade que afeta as obras civis em todo mundo é a corrosão de armaduras. No Brasil essa situação deve ser levada a sério, pois importantes cidades se situam em regiões litorâneas onde há uma ação agressiva da atmosfera rica em cloretos, e cidades como São Paulo e Belo Horizonte sofrem pelas ações hostis de ambientes urbanos/industriais (Casculo, 1997).

Globalmente o número de estruturas continua a aumentar, do mesmo modo que a sua idade média. Gradativamente, a necessidade de manutenção é inevitável. A reposição completa de uma estrutura representa um desperdício de recursos, dessa forma a reabilitação é uma alternativa viável (Beber, 2003).

A partir dos fatores apresentados, este trabalho visa estudar as técnicas executadas comumente em obra, com finalidade de analisar os materiais: concreto, graute, adesivo estrutural, utilizados no reparo de elementos estruturais de concreto armado, assim como o reforço estrutural utilizando manta de fibra de carbono.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Corrosão de armaduras

O concreto armado apresenta características mecânicas desenvolvidas e durabilidade adequada onde é utilizado. A durabilidade do concreto é um resultado natural, do efeito que o mesmo exerce sobre o aço. De um lado o cobrimento do concreto é uma barreira física, mas por outro, a alta alcalinidade do concreto desenvolve sobre o aço uma camada passiva que permanece inalterado por um tempo indeterminado (Andrade, 1992).

O concreto é um sólido compacto e denso, porém poroso. A rede de poros do concreto é um entramado de canais e capilares, por vez não é ligado entre si, mas possibilitam que o concreto apresente uma determinada permeabilidade aos líquidos e gases. Dessa forma, mesmo que o concreto seja uma barreira física, esta é permeável em certo nível e permite acesso de agentes agressivos até o aço (Andrade, 1992).

Para alcançar uma baixa porosidade no concreto, alguns fatores necessitam atenção, como a relação de água e cimento, que deve ser baixa e densa, e a granulometria utilizada, que deve ser bem graduada (Neville, 1997).

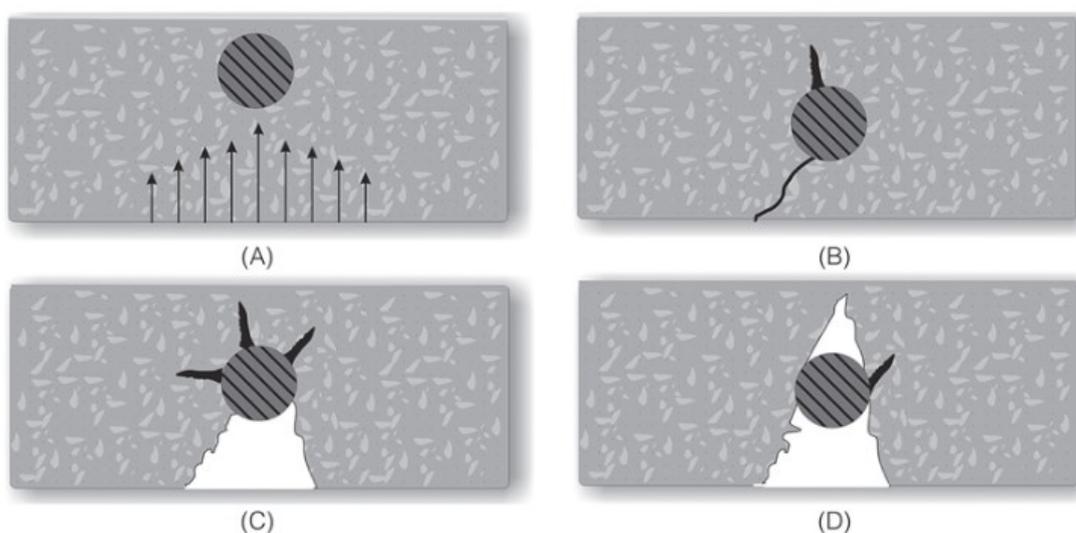
O Cobrimento da armadura é um elemento muito importante. Uma vez que sua especificação de projetor for inadequada (frente a agressividade ambiental), assim como sua espessura não tiver uniformidade ao longo da peça estrutural (erros na execução), os processos corrosivos são facilitados ou acelerados. A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina a espessura em função da classe de agressividade do ambiente, mas, infelizmente, a qualidade do concreto não é considerada nessa recomendação (Cascardo, 1997).

Ribeiro (2018, p. 10) diz que “de uma maneira geral, a corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente, resultando na perda de massa do material”.

Nas regiões em que não há um cobrimento adequado do concreto, a corrosão torna-se progressiva e obtém-se a formação de óxi-hidróxidos de ferro, que por sua vez ocupam volumes três a sete vezes superior ao volume original do aço da armadura, que podem causar pressões de expansão superiores a 15 MPa (Ribeiro, 2018).

Ainda segundo Ribeiro (2018, p. 143): “Essas tensões provocam, inicialmente, a fissuração do concreto na direção paralela à armadura corroída, a penetração de agentes agressivos, como Dióxido de carbono (carbonatação) e cloretos, podendo causar o lascamento do concreto, (A) Penetração de agentes agressivos; (B) fissuração devido às forças de expansão dos produtos de corrosão; (C) lascamento do concreto e corrosão acentuada; e (D) redução significativa da seção da armadura”, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Deterioração da corrosão das Armaduras



Fonte: Ribeiro (2018)

No Brasil a problemática da deterioração de estruturas de concreto, por corrosão de armaduras, é encontrada em todo território nacional, ainda que as regiões litorâneas são as que despertem maior preocupação, os estudos que comprovam esse comportamento são diversos. Na região Norte, Aranha (1994) observou que 46% das manifestações patológicas se atribuíam a corrosão de armaduras. No Nordeste, em Recife, Andrade (1997) obteve percentuais de 64%. No Centro-Oeste, Nince (1996) constatou que 30% das incidências se tratava de corrosão de armaduras, aproximando-se do valor apresentado por Carmona e Marega (1988) para a região Sudeste. Finalmente, na região Sul, Dal Molin (1988) relacionou 40% das manifestações patológicas com a corrosão de armaduras (Meira, 2017).

Os problemas de corrosão, em geral, só se manifestam depois de vários anos da concepção da estrutura, geralmente acima de 10 anos. Por esse motivo, há

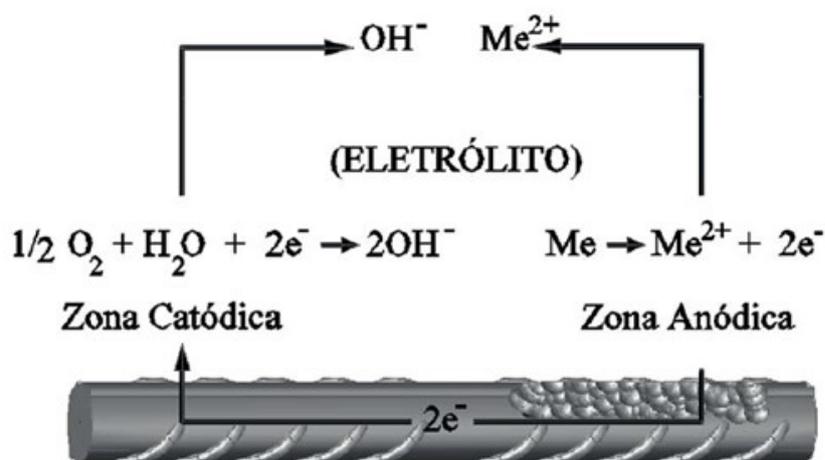
dificuldade da maioria dos profissionais de Projeto e de Execução de obras em adotar, ou mesmo compreender e empregar medidas efetivas de proteção como: aumento da resistência característica, redução da relação água/cimento, espessura de cobrimento ideal, instalações de rufos, chapins, realização de uma cura correta e outras medidas como proteção e impermeabilização da superfície do concreto. Normalmente o fenômeno de corrosão acontece durante a fase de uso e operação da obra, anos depois da execução acabada, o que causa uma falsa impressão de que esse fenômeno não tem ligação com as decisões equivocadas de projeto e a má-execução da estrutura (Ribeiro, 2018).

4.1.1 Corrosão eletroquímica

No caso da construção civil, a corrosão eletroquímica é a mais importante, visto que ocorre nas estruturas de concreto armado e pode atingir níveis de deterioração muito significativos. Nesse tipo de corrosão, temos uma reação de oxidação e uma de redução juntamente com a circulação de íons por meio de um eletrólito. Na reação de oxidação, o metal libera elétrons, que deslocam por meio deste, reagindo em outro local para produzir a redução de outra substância, que em relação ao concreto armado é o oxigênio (Meira, 2017).

Na corrosão eletroquímica se pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica, que gera: a existência de um ânodo, caracterizado pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação), um cátodo, onde são utilizados os elétrons gerados na região anódica (redução), uma diferença de potencial entre os dois, em que o ânodo possui potencial mais eletronegativo, uma ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, que é possível ser caracterizada pela condução iônica por meio do eletrólito. A Figura 2 mostra esse fenômeno e exhibe as reações parciais que se processam nas regiões anódica e catódica, características de um meio alcalino como o concreto (Meira, 2017).

Figura 2 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal



Fonte: Meira (2017)

Na equação da direita, na Figura 2, tem-se a representação das reações parciais de dissolução do metal (oxidação). Na equação da esquerda, na Figura 2, tem-se a representação das reações parciais catódicas, que são caracterizadas pelo consumo dos elétrons produzidos na área anódica. O processo completo de corrosão eletroquímica é representado pelo conjunto dessas reações, o controle de qualquer das reações parciais caracteriza um controle sobre o processo de corrosão (Meira, 2017).

4.1.2 Carbonatação do concreto

A carbonatação do concreto é um processo essencial para o início da corrosão das armaduras, trata-se da deterioração química do concreto (Casculo, 1997).

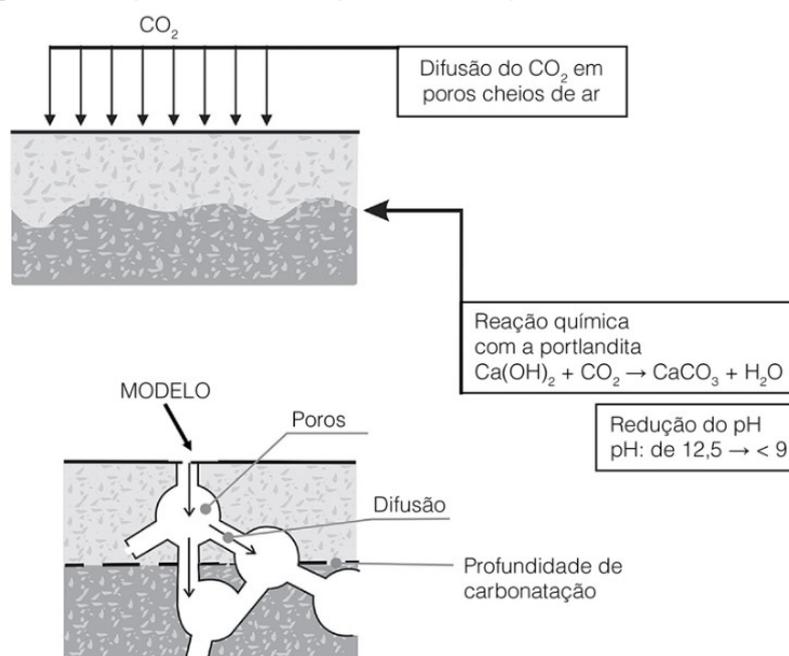
Quando o concreto é exposto aos gases como gás carbônico (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S), é possível ter reduzido o pH da solução existente nos seus poros. A elevada alcalinidade da solução intersticial em função, principalmente, à presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), proveniente das reações de hidratação do cimento, também poderá ser reduzida. Esta perda de alcalinidade, em processo de neutralização, por ação, principalmente, do gás carbônico (CO_2), que modifica os compostos do cimento em carbonatos, é um processo chamado carbonatação (Ribeiro, 2018).

Considerando que o pH de precipitação do Carbonato de cálcio (CaCO_3) é da ordem de 9,4 (à temperatura ambiente), obtém-se uma alteração substancial das condições de estabilidade química da capa ou película passivadora do aço (Casculo, 1997).

Um ensaio simples que pode ser executado para identificar a carbonatação, é a aplicação de uma solução aquoalcoólica de fenolftaleína na superfície de concreto em que se acredita estar carbonatada. A parte do concreto que está carbonatada permanece da mesma cor, por outro lado a parte que não está assume a coloração rosada (Bertolini, 2010).

Com a capa de passivação descaracterizada pela carbonatação, há uma corrosão do aço de forma generalizada, como se encontrasse exposto a atmosfera sem qualquer proteção. A Figura 3 mostra a representação esquemática do processo de carbonatação (Casculo, 1997).

Figura 3 - Representação esquemática do processo de carbonatação



Fonte: Ribeiro (2018)

4.1.3 Ação de cloretos

Os cloretos são os contaminantes comuns mais documentados na literatura como causador de corrosão dos metais no concreto. Estes íons são inseridos intencionalmente no concreto, em forma de agente de pega e endurecimento, ou podem vir por meio de agregados e água de amassamento contaminados, ou ainda, podem penetrar por sais anticongelantes, salmouras industriais e maresia ou névoa de ambiente marinho (Cascardo, 1997).

Os cloretos estão no concreto de duas formas: como cloretos “livres”, que são na forma de íons na água dos poros, ou como cloretos “combinados” que formam parte das fases hidratadas do cimento. Os cloretos livres, são os cloretos de fato perigosos e agressivos à armadura, já os cloretos combinados encontram-se combinados na forma de cloroaluminios. Os cloretos livres somados com os combinados são denominados cloretos “totais” (Andrade, 1992).

Uma vez que os cloretos penetram no concreto, parte deles liga-se quimicamente aos compostos que contêm aluminatos (C_3A e C_4AF), formando o sal Friedel ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), parte é absorvida pelo gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e uma outra parte aparece livre para interagir em processos corrosivos. A quantidade que é necessária de íons cloretos para despassivar uma armadura está ligada com a concentração de íons hidroxila presentes nos poros (Ribeiro, 2018).

Nos Estados Unidos há um limite aceito de 1,3 Kg de cloretos por m^3 de concreto. A Agência de Rodovias do Reino Unido considera um limite de 0,3% de cloretos, obtido de acordo com a norma Bs 1881-124:88 (Ribeiro, 2018).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014): “Não é permitido o uso de aditivos contendo cloreto na sua composição em estruturas de concreto armado ou protendido”.

4.1.4 Ação de ácidos

O hidrogênio que tem sua origem mais comum através dos ácidos, pode contribuir para a deterioração do concreto, o grau de reação causado por esse elemento é determinado por sua concentração, e pela solubilidade do sal cálcio resultante (Souza; Ripper, 1998).

Muitos são os tipos de ácidos agressivos para o concreto, os inorgânicos (clorídrico, sulfídrico, nítrico, carbônico, etc.), ou orgânicos, geralmente encontrados na terra (acético, láctico, esteárico, etc.). Em ambos os casos, a ação do íon hidrogênio causa a formação de produtos solúveis, o transporte desses elementos pelo interior do concreto causa a deterioração (Souza; Ripper, 1998).

Ribeiro (2018, p. 186) diz que “a ação deletéria dos ácidos sobre o concreto se dá por meio da reação entre sua matriz cimentícia e o ácido, principalmente sobre os hidróxidos de cálcio”.

Os ambientes industriais ou com presença de esgotos são muito compatíveis a apresentar ataques por ácidos. Nos ambientes industriais, os gases poluentes entram em contato com hidrogênio e o vapor d'água da atmosfera, e produz chuva ácida, que causa a dissolução da matriz cimentícia do concreto por ação do baixo pH. Os ambientes com presença de esgotos possuem muitas bactérias causadoras da formação do ciclo do enxofre, em que há a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4), que degradará o concreto (Ribeiro, 2018).

4.2 Recuperação de elementos de concreto armado

A escolha de um método ou sistema de reparo, resulta de várias variáveis, que inclui fatores como a possibilidade de acesso à zona a ser reparada, fatores econômicos e fatores técnicos. Existe uma ampla oferta de materiais e sistemas relacionados com o reparo e reforços de estruturas, porém, a experiência científica acumulada é pequena, e em certos casos ocorre falhas precoces de reparo que poderiam ser evitadas com uma avaliação mais cuidadosa da situação (Andrade, 1992).

Sobre a corrosão das armaduras em estruturas de concreto Cascudo (1997) descreve as principais alternativas de reparos, e alguns tratamentos voltados para a corrosão das armaduras, são eles: reparos localizados, reparos generalizados, remoção eletroquímica dos cloretos, controle do processo catódico, eliminação do eletrólito, proteção catódica, impregnação profunda do concreto com polímeros e impregnação do concreto com inibidores de corrosão.

Na construção civil a alternativa mais utilizada para reparo de uma estrutura, é o reparo localizado, que consiste em expor a armadura nos locais corroídos e executar o tratamento das barras, seguido da reconstituição da seção de concreto.

No trecho tratado, além da limpeza superficial, deve-se empregar pinturas protetoras de preferência epoxídicas ricas em zinco, esse atua como ânodo de sacrifício em benefício da durabilidade do aço (Cascudo, 1997).

4.2.1 Preparo do substrato

Helene (1992, p. 41) diz que “O preparo do substrato é entendido como o conjunto dos procedimentos efetuados antes da limpeza superficial e da aplicação propriamente dita dos materiais e produtos da correção”.

Na preparação todo substrato deteriorado, contaminado ou danificado é removido para receber os materiais que serão utilizados no reparo, o primeiro passo é efetuar um rigoroso exame da estrutura (visual, por percussão, etc.), para detectar quais as áreas a serem reparadas. Sem a preparação adequada, não serão alcançados os resultados desejados dos reparos (Granato, 2012).

O próximo passo para o preparo é marcar e delimitar as áreas a serem reparadas, geralmente utiliza-se um desenho geométrico retangular ou quadrado, para facilitar na execução, além disso a estética do acabamento da área reparada deve ser considerada. Feito a delimitação, um corte ortogonal na região delimitada é efetuado, para retirar todo o concreto ao redor da armadura (Granato, 2012).

A Figura 4 mostra a remoção do concreto por meios manuais, com o auxílio de martelo e talhadeira.

Figura 4 - Remoção do concreto com uso de marreta e talhadeira



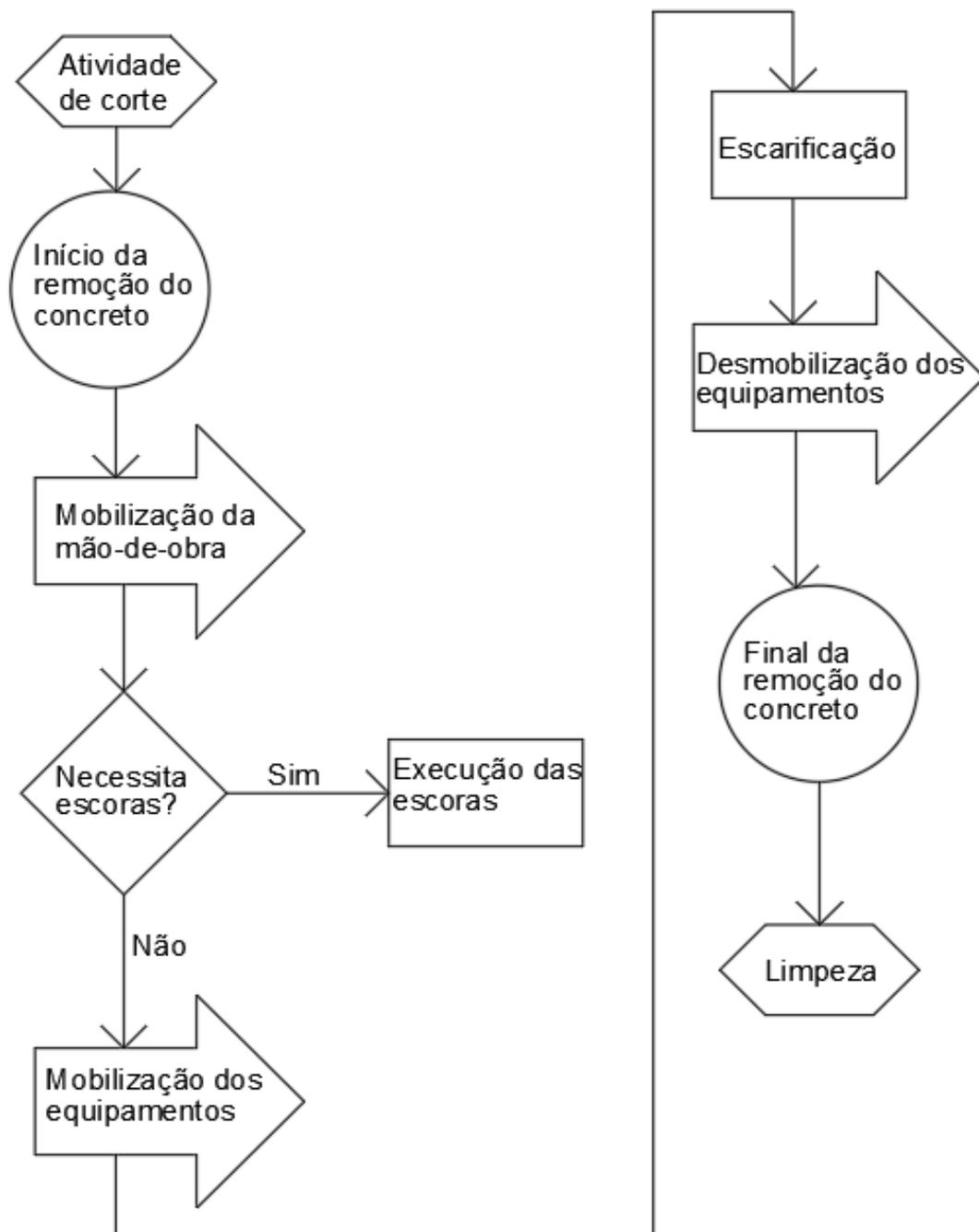
Fonte: Silveira (2009)

Para remoção do concreto com marreta e talhadeira, deve-se escarificar de fora para dentro, sem utilizar golpes que possam lascar as arestas e contornos da região que será tratada. Todo o material solto, mal compactado e segregado deve

ser retirado, até atingir o concreto em boa condição, alcançando superfície rugosa e coesa, proporcionando boas condições de aderência (Helene, 1992).

O fluxograma da Figura 5 mostra o processo de preparo do substrato.

Figura 5 - Fluxograma de preparo do substrato



Fonte: Santos (2018)

4.2.2 Limpeza

As armaduras devem ser limpas rigorosamente, para a retirada de todo o traço de oxidação (Granato, 2012).

De acordo com o relatório PAULIS-RT-01-2019-RO (DESEK, 2019), na preparação das armaduras, essas devem estar livre de oxidação, agentes contaminantes ou produtos originados da corrosão. Os métodos para remoção da corrosão superficial das barras são, escovação, lixamento ou hidrojateamento. Para a escovação e o lixamento é necessário a utilização de escova de cerdas, lixa manual ou lixadeira elétrica.

O relatório PAULIS-RT-01-2019-RO (DESEK, 2019), também diz que na preparação da armadura, essa deve ficar conforme padrão AS 2½, a parte de trás da armadura também deve ser limpa. A Figura 6, a Figura 7 e a Figura 8 ilustram as situações de remoção dos produtos de corrosão da armadura.

Figura 6 - Remoção de produtos da corrosão com escovas de cerdas de aço



Fonte: Silveira (2009)

Figura 7 - Remoção de produtos da corrosão com lixa manual



Fonte: Silveira (2009)

Figura 8 - Remoção de produtos da corrosão com lixadeira elétrica



Fonte: Silveira (2009)

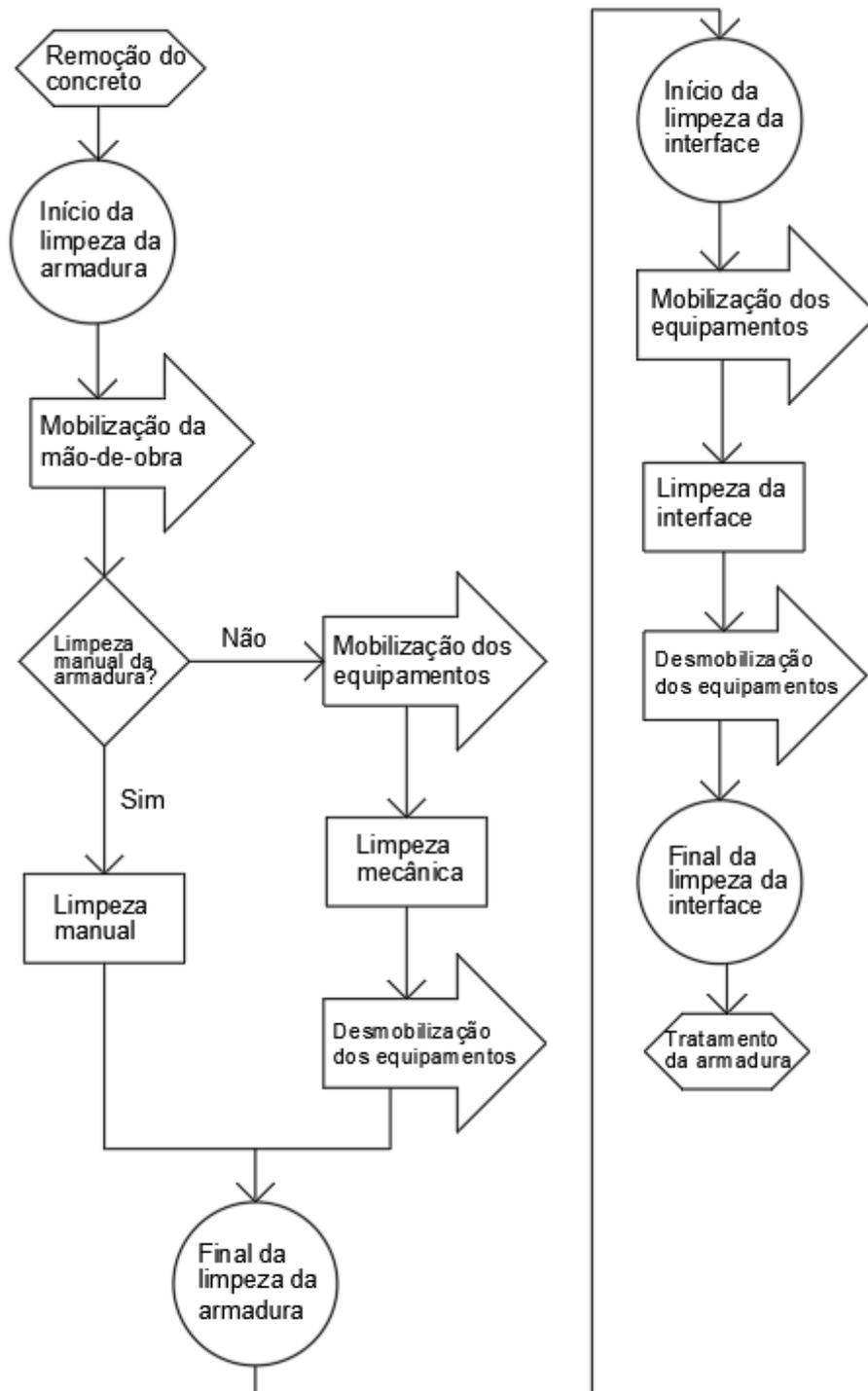
Ainda segundo o relatório PAULIS-RT-01-2019-RO (DESEK, 2019), quando a limpeza é finalizada, deve-se fazer uma criteriosa inspeção visual para avaliar se todos os locais da armadura se apresentam livres de carepas, também é necessário verificar se a armadura possui diâmetro maior que 10% do diâmetro original (área transversal). Caso a perda de seção por corrosão seja igual ou maior que 10% de sua seção transversal original ou seccionamento de barras, é indispensável executar à complementação com uma nova barra, utilizando transpasse, solda ou luvas rosqueáveis.

Helene (1992, p. 41) diz que “a limpeza das superfícies é entendida como o conjunto de aplicação dos procedimentos efetuados instantes antes da aplicação propriamente dita dos materiais de recuperação”.

Os principais procedimentos de limpeza das superfícies são: Jato de água fria, Jato de água quente, vapor, solução ácidas, solução alcalina, remoção de óleos e graxas superficiais, jato de ar comprimido, solventes voláteis e saturação com água (Helene, 1992).

O fluxograma da Figura 9 mostra o processo de limpeza.

Figura 9 - Fluxograma de limpeza



Fonte: Santos (2018)

4.2.3 Tratamento da patologia

Para a escolha da técnica empregada na reabilitação de estruturas de concreto armado, deve-se basear no conhecimento das causas e extensão da deterioração, de modo a escolher a técnica mais apropriada e econômica para a situação ocorrida (Ribeiro, 2018).

Quando a corrosão das armaduras ocorre devido à contaminação do concreto por íons cloreto, as técnicas mais utilizadas na reabilitação são, a proteção catódica e a dessalinização. Em estruturas carbonatadas, a reparação convencional e a realcalinização, são as técnicas mais utilizadas. A reparação convencional trata-se da remoção mecânica do concreto contaminado, e a substituição por material novo. Essa técnica é pouco eficaz a longo prazo em estruturas contaminadas por íons cloreto (Ribeiro, 2018).

Segundo Ribeiro (2018), a proteção catódica pode ser aplicada de duas formas, por ânodos galvânicos ou por corrente impressa. Na primeira técnica, a armadura corroída é ligada diretamente a um metal mais ativo (ânodo de sacrifício), geralmente o metal mais ativo utilizado são as ligas de zinco. Na técnica por corrente impressa, utiliza-se um ânodo e uma fonte exterior de corrente elétrica contínua durante a vida útil da estrutura, reduzindo a velocidade de corrosão até aproximar-se de zero. A dessalinização também consiste em aplicar corrente elétrica contínua, porém temporariamente.

A realcalinização geralmente utilizada em estruturas carbonatadas, é outra técnica que aplica corrente elétrica contínua temporária. Nessa técnica é utilizada uma malha metálica externa (como ânodo), encapsulada num eletrólito (Ribeiro, 2018).

A pintura epóxi é uma técnica utilizada para a prevenção da corrosão de ambos os casos, carbonatação e contaminação por íons cloreto. Para uma boa eficiência dessa técnica, a pintura deve cobrir a armadura uniformemente e com espessura adequada, sem afetar a aderência entre a armadura e o concreto, ter boa resistência, boa aderência à armadura e ter flexibilidade suficiente para permitir as dobras da armadura. Imperfeições na pintura podem comprometer a proteção da armadura, provocando altas taxas de corrosão (Meira, 2017).

A Figura 10 mostra armaduras com pintura epóxi, com e sem corrosão.

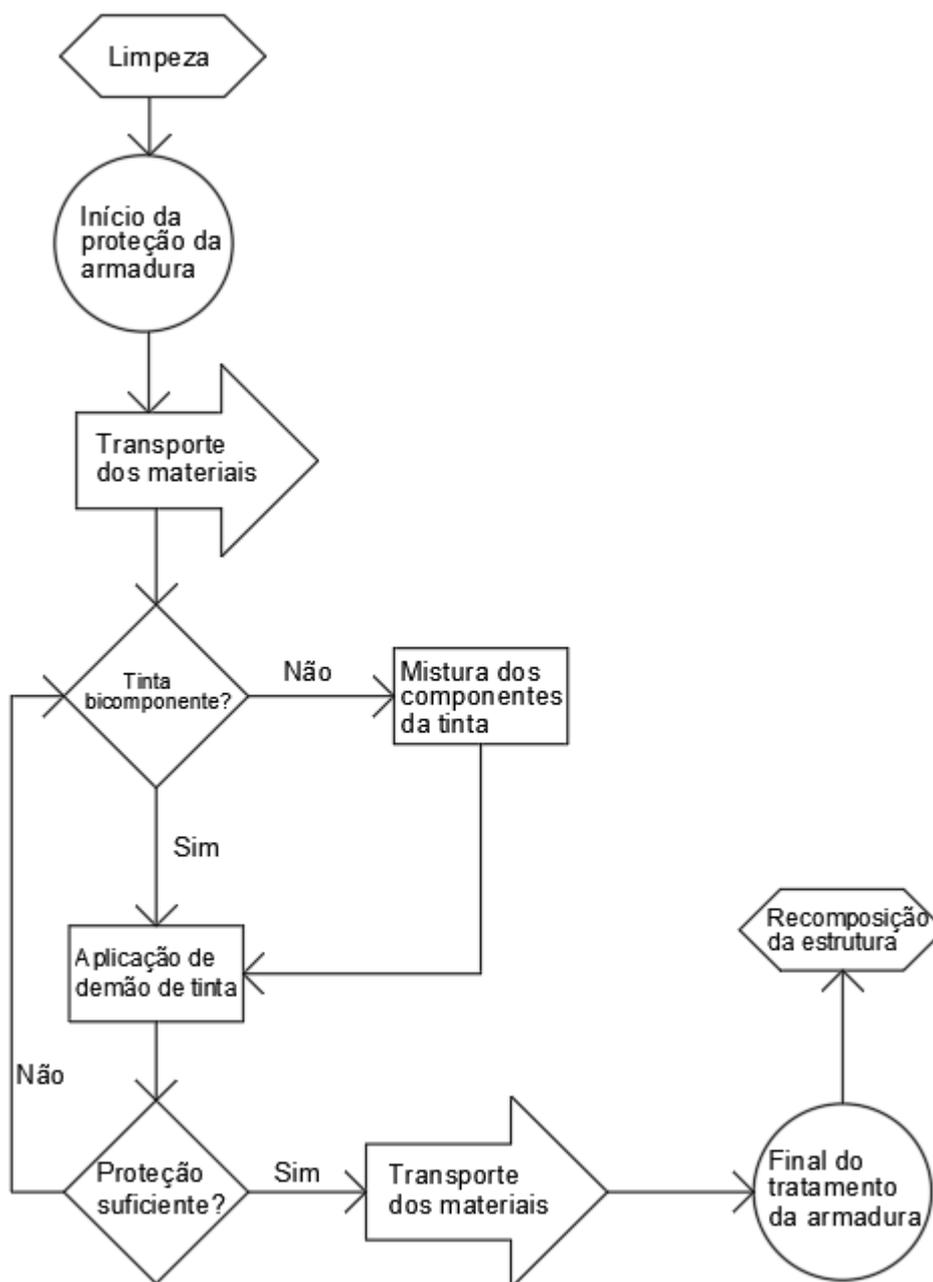
Figura 10 - Armaduras com pintura epóxi, com e sem corrosão



Fonte: Meira (2017)

O fluxograma da Figura 11 mostra o processo de tratamento da armadura com maior percepção.

Figura 11 - Fluxograma do processo de tratamento da armadura



Fonte: Santos (2018)

4.2.4 Recomposição da estrutura

A demanda de reparar ou reforçar uma estrutura, com o objetivo de restaurar sua segurança e aumentar sua durabilidade, tem aumentado por motivos diferentes, como estruturas mais esbeltas, solicitações mais intensas, ambientes mais agressivos, dentre outros. O diagnóstico adequado do problema patológico

deve ser realizado por um especialista e os serviços inicializados a partir desse diagnóstico (Helene, 1992).

Os reparos podem ser classificados em reparos rasos ou superficiais, reparos semiprofundos e reparos profundos, essa classificação depende de sua profundidade (Souza; Ripper, 1998).

A argamassa normalmente é utilizada para reparos superficiais de qualquer tamanho em área, em profundidades de no máximo 5 cm (mantendo certa relação com a área), esse tipo de técnica é empregado em casos que a camada de concreto de cobertura das armaduras está deteriorada. O tipo de deterioração ocorrido vai selecionar qual argamassa será utilizada, os tipos de argamassas utilizadas nesse serviço geralmente são, argamassa de cimento e areia, argamassas com polímeros e argamassas epoxídicas (Souza; Ripper, 1998).

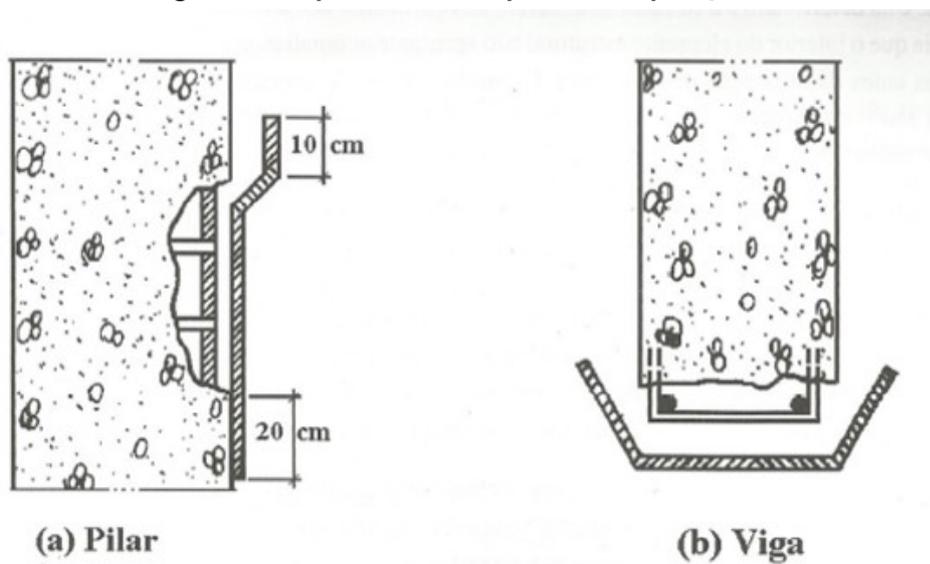
O concreto moldado é tradicionalmente utilizado para reparação estrutural. Normalmente é empregado em reparos de maiores dimensões, por meio de utilização de cimentos e compostos especiais, e apresenta características como impermeabilidade, resistência, minimização de retração e outras características modificadas (Granato, 2012).

Outro tipo de concreto utilizado para reparos é o projetado. Esse tipo de concreto dispensa fôrmas nas aplicações verticais ou sobrecabeça, tem melhor aderência, maior compacidade e impermeabilidade. O concreto projetado é aplicado via seca e via úmida. Geralmente é utilizado para reparos de profundidade média e profunda (Granato, 2012).

Segundo Souza e Ripper (1998) “a utilização de fôrmas é muitas vezes necessária, e em casos de cavidades de grandes dimensões elas devem ser preenchidas em camadas horizontais, movendo-se as fôrmas de baixo para cima a medida que a cavidade for preenchida”.

A Figura 12, “a” e “b” mostra alguns tipos de fôrmas que podem ser utilizadas.

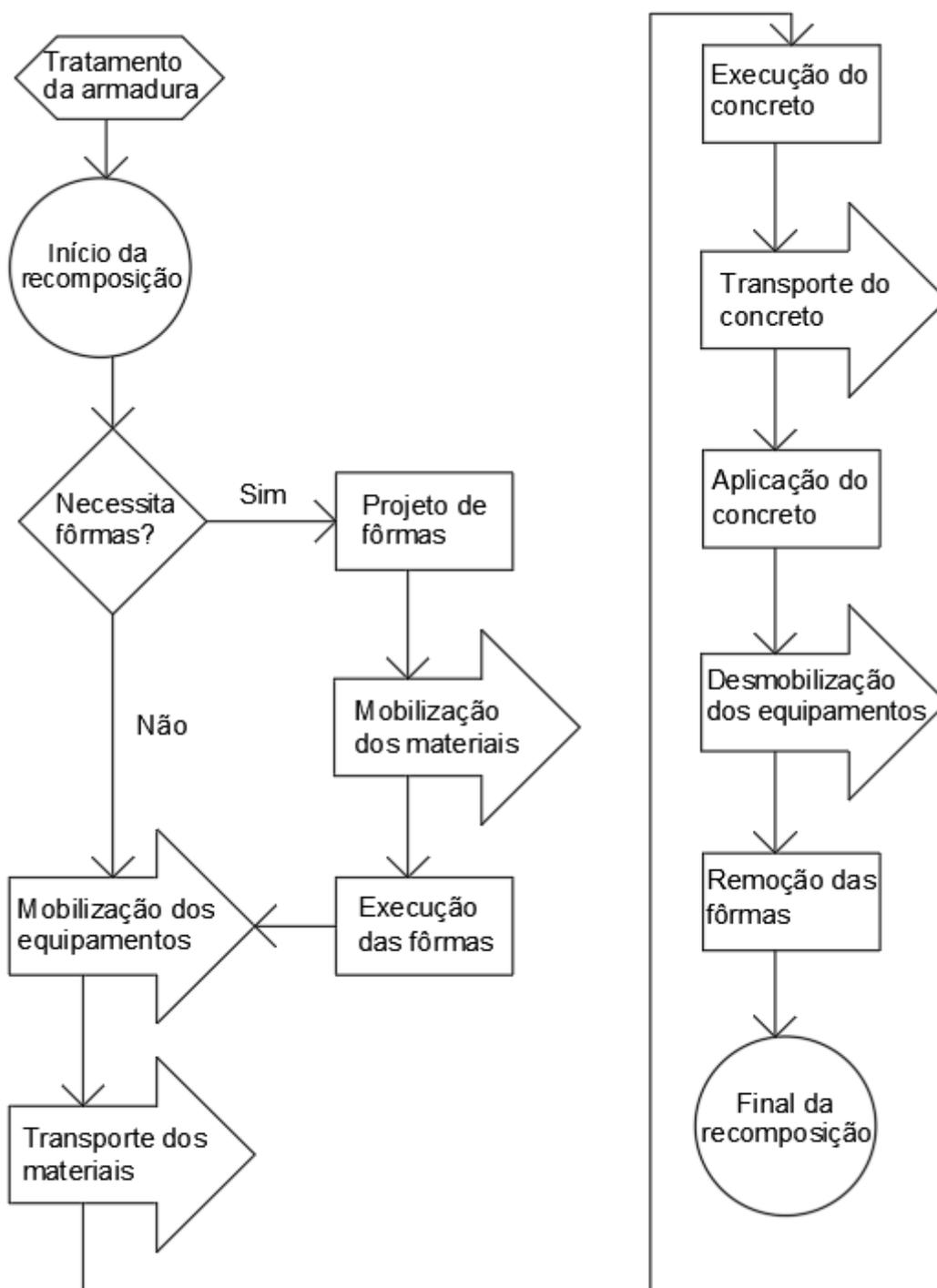
Figura 12 - Tipos de fôrmas para recomposição



Fonte: Souza e Ripper (2017)

O fluxograma da Figura 13, mostra o passo a passo de uma recomposição.

Figura 13 - Fluxograma da recomposição



Fonte: Santos (2018)

4.3 Adesivos estruturais

Segundo Granato (2012), “os adesivos são materiais de grande utilização como material auxiliar de reparações. Os mais utilizados são as resinas epóxi (fluidas, em pasta ou gel) e as resinas acrílicas, estas últimas puras ou em calda de cimento”

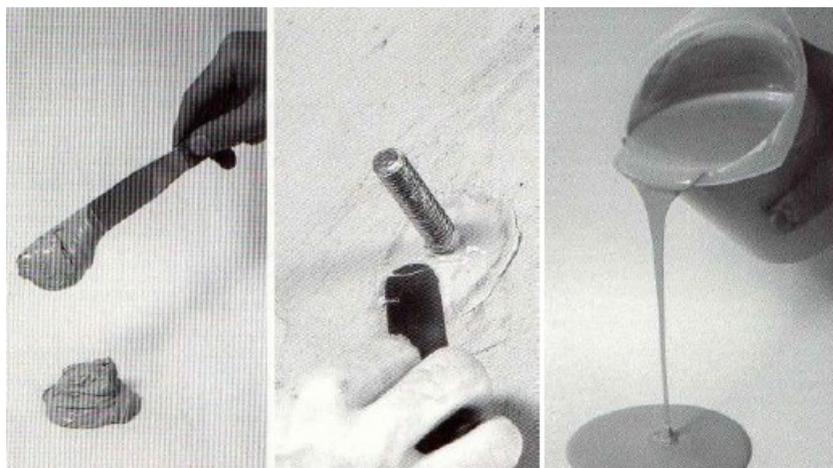
As resinas epóxi geralmente são utilizadas para colagens de um novo concreto com o concreto velho da peça estrutural, também é aplicada em locais de alta exigência de cargas, como em fixação de pinos e tirantes, colmatação de trincas antes de injeções (Granato, 2012).

O adesivo epóxi, utilizado na colagem de m novo concreto, é utilizado para reparos profundos, é necessário que seja aplicado sobre uma superfície já preparada e seca. Depois do preparo da resina epóxi, ela deve ser pintada sobre a superfície do concreto e das barras da armadura através de uma trincha ou pistola. Em relação a dosagem do concreto, resultara da resistência requerida, agregados graúdos com diâmetro superior a 9,5 mm, não deve ser aplicado, o agregado deve ser aplicado dentro do “pot-life” da resina (Souza; Ripper, 1998).

O látex acrílico é empregado como primer de ligação de argamassas de reparo, também é utilizado para outras aplicações típicas (Granato, 2012).

A Figura 14 mostra o adesivo epóxi em pasta e fluido.

Figura 14 - Adesivo epóxi em pasta e fluido



Fonte: Granato (2012)

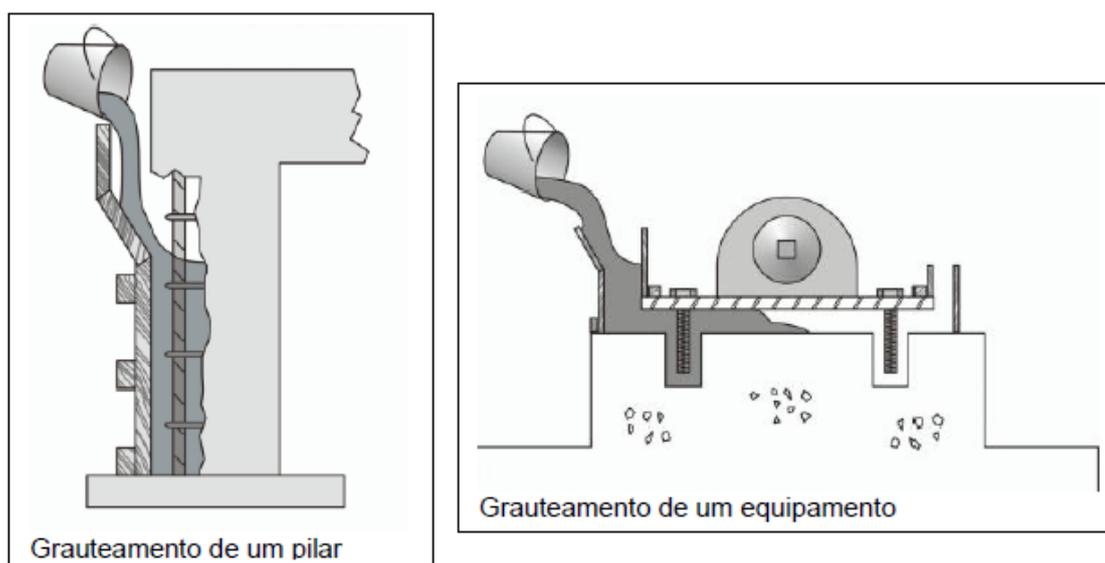
4.4 Graute

O graut pode ser de base mineral ou de base epóxi. Esse material é uma argamassa de grande fluidez, resistência elevada, não manifesta retração e é auto-adensável. É utilizado para reparos profundos e semiprofundos, a superfície em que for aplicado deve estar preparada e úmida. Visto que o graute alcança elevadas resistências rapidamente, pode-se retirar as formas em 24 horas, bem como o excesso do material. É necessária uma cura úmida de no mínimo 3 dias (Souza; Ripper, 1998).

As aplicações do graute são variadas, como reparos estruturais, chumbamento de equipamentos, ancoragem de tirantes, etc. No caso da utilização de graut para grandes vãos, base cimentícia brita lavada de até 9 mm, normalmente até 30% do volume do graute pode ser acrescentada (Granato, 2012).

A Figura 15 mostra o grauteamento de um pilar e um equipamento.

Figura 15 - Grauteamento de um pilar e um equipamento



Fonte: Granato (2012)

4.5 Reforço das estruturas de concreto armado

Segundo Granato (2012, p. 175), “o reforço é o processo de somar capacidade de resistência para uma estrutura ou parte dela. Por exemplo o reforço de um pilar existente somará resistência à compressão, aumentando sua capacidade”.

De acordo com Beber (2003, p. 31), “juntamente com o advento do concreto, a demanda pelo reforço estrutural surgiu como resposta aos problemas de deterioração, projetos inadequados e problemas de construção”.

O projeto de reforço deve considerar vários fatores, entre eles a concepção original da estrutura, sua história, as falhas ou os novos requisitos, assim como a disponibilidade de matérias e mão-de-obra, mas previamente, o projeto de reforço dependerá da formação técnica e criatividade do profissional qualificado (Souza; Ripper, 1998).

Inicialmente, devido à falta de conhecimento sobre o comportamento das estruturas, as técnicas de reforço restringiam-se à o acréscimo de novos elementos, apoios e no aumento das seções resistentes, métodos que são comuns até hoje. Na atualidade juntamente com o surgimento de novas tecnologias, novas técnicas de reforço foram desenvolvidas (Beber, 2003).

4.5.1 Reforço por adição de chapas e perfis metálicos

O reforço exterior por colagem ou chumbamento de chapas ou perfis metálicos, é uma técnica eficiente e de rápida execução para acrescentar capacidade resistente, em elementos estruturas que requerem emergência ou não toleram grandes modificações na geometria da peça (Souza; Ripper, 1998).

A Figura 16 mostra o reforço com chapas metálicas coladas e chumbadas.

Figura 16 - Reforço com chapas metálicas coladas e chumbadas



Fonte: Souza e Ripper (1998)

A adesão entre o concreto e o metal é extremamente relevante para que o sistema funcione de forma adequada. Os fatores que interferem nessa adesão são a qualidade do adesivo, a condição das superfícies e as propriedades de ambos os materiais (Cánovas, 1988).

A colagem de chapas metálicas ao concreto necessita de resina com elevada capacidade de aderência a resistência mecânica. Alguns autores opinam que se deve utilizar apenas adesivos epoxídicos para esse tipo de reforço, ao mesmo tempo que outros consideram que tanto as resinas epoxídicas como as de poliéster podem ser empregadas e obterem resultados seguros (Souza; Ripper, 1998).

A Figura 17 mostra um reforço por adição de chapas metálicas.

Figura 17 - Reforço por adição de chapas metálicas



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Em elementos estruturais reforçados com chapas de aço sujeitos a flexão, aparecem tensões tangenciais no material de união entre o concreto e o metal, em razão do momento fletor, que entre outros fatores tem forte influência pela espessura da resina (Cánovas, 1988).

Souza e Ripper (1998, p. 150) diz que, “as espessuras de cola devem sempre ser pequenas, da ordem do milímetro, e que é a resistência do concreto à tração que condiciona a resistência última da ligação, pelo que será perigoso estabelecer-se sistemas de reforço deste tipo para concretos com $f_{ck} < 17,5 \text{ Mpa}$ ”.

4.5.2 Reforço com fibras de carbono

No Japão antes de ser adaptada ao reforço de estruturas, a fibra de carbono já era largamente utilizada para reforços de alto desempenho, nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística, obtendo o melhor partido de um material altamente resistente, de simples aplicação e não oferece ao concreto problemas de durabilidade relacionados à corrosão das armaduras (Souza; Ripper, 1998).

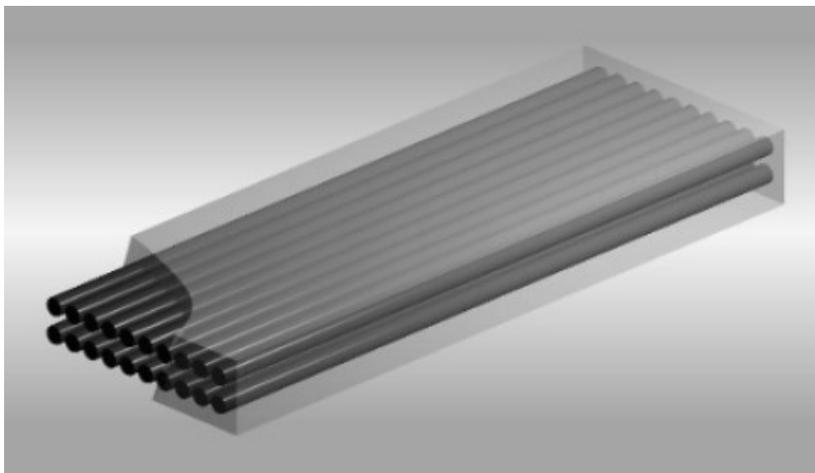
A aplicação de fibra de carbono como reforço estrutural ainda é baixa, devido principalmente ao custo elevado na produção do material, porém na fibra de carbono há um grande potencial para esse tipo de utilização, podendo ser utilizado em estruturas que não poderiam ser reforçadas com materiais convencionais (Beber, 2003).

Segundo Granato (2012, p. 180), “a fibra de carbono é um subproduto de materiais à base de poliacrilonitril, oxidada a partir de $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. O material, em forma de fibras, tem seus átomos perfeitamente alinhados”.

A matriz polimérica e o elemento estrutural são os dois elementos fundamentais para a construção do sistema composto estruturado de fibra de carbono. O primeiro elemento é responsável por manter as fibras em estrutura de forma coesa, proporcionando assim a transferência das tensões de cisalhamento entre o concreto e a fibra de carbono. O segundo elemento, que é constituído pelas fibras de carbono dispostas em uma única direção dentro das matrizes poliméricas, absorve as tensões resultantes dos esforços solicitantes que atuam na peça (Machado, 2002).

A Figura 18 mostra o esquema de um sistema composto estruturado com fibras de carbono.

Figura 18 - Sistema composto estruturado com fibras de carbono

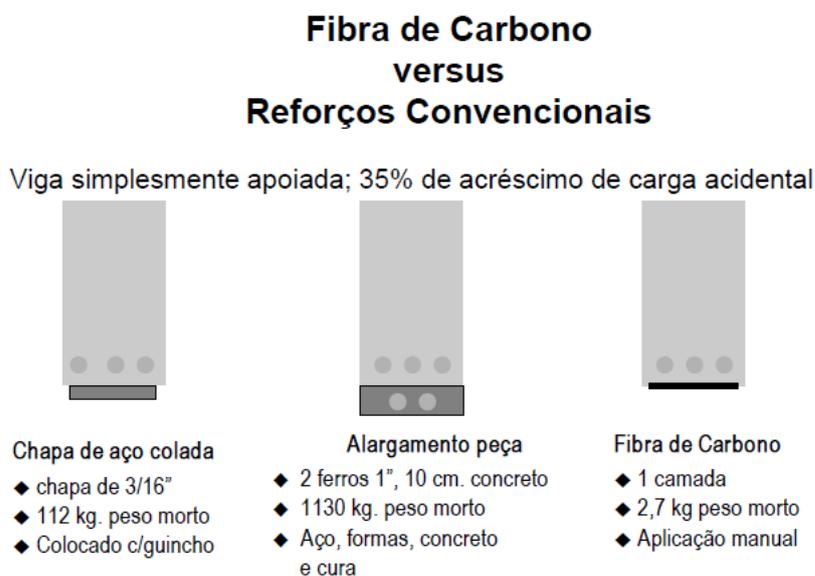


Fonte: Granato (2012)

Para a execução dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono temos a seguinte sequência: recuperação do substrato de concreto armado, imprimação da superfície, regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto, aplicação da primeira camada de resina saturante, aplicação da lâmina de fibra de carbono, aplicação da segunda camada de resina saturante (Machado, 2002).

A Figura 19 mostra a fibra de carbono versus reforços convencionais em viga simplesmente apoiada.

Figura 19 - Fibra de carbono versus reforços convencionais



Fonte: Granato (2012)

4.5.2.1 Materiais e propriedades

Várias resinas são utilizadas nos sistemas compósitos, entre elas pode-se citar os imprimadores primários, os regularizadores de superfície, os saturantes e os adesivos. Normalmente elas são à base de epoxídios, ésteres de vinil e poliésteres, as resinas foram desenvolvidas para fácil manuseio e aplicação (Machado, 2002).

Os imprimadores primários são aplicados para penetrar no substrato de concreto, para proporcionar por meio do seu adesivo específico, a concepção de uma ponte de aderência para os adesivos aplicados em seguida. No preenchimento de vazios ou reparação de imperfeições superficiais, para obter uma superfície lisa e desempenada, onde será colado o sistema compósito, utiliza-se os regularizadores de superfície (Machado, 2002).

O papel das resinas de saturação é a impregnação das fibras, fixando-as no local e assegurando um meio eficaz para transferência das tensões de cisalhamento entre elas. Outro papel da resina de saturação é como adesivo para o sistema pré-impregnados. Os adesivos têm a função de colagem, do sistema compósito e o concreto (Machado, 2002).

As fibras mais utilizadas como reforço estrutural são as de aramida, vidro e de carbono, essas fibras possibilitam ao sistema suas características de resistência e espessura. As principais características dos compósitos de fibras de carbono

comercializados são: alta resistência mecânica e a ataques químicos diversos, alta rigidez, não são afetadas pela corrosão, estabilidade térmica, bom comportamento à fadiga, muito leves (Machado, 2002).

Em relação as propriedades físicas das fibras de carbono, a densidade varia entre 1,6 a 1,9 g/cm³, aproximadamente 5 vezes menor que do aço. Outra propriedade interessante nas fibras de carbono é a temperatura de transição vítrea, ou seja, aquela a partir da qual o polímero começa a ficar mole, normalmente se situa na faixa entre 80°C e 100°C (Machado, 2002).

Sobre as propriedades mecânicas, as fibras de carbono comercializadas possuem baixo módulo de elasticidade e alta resistência à tração, e variam conforme o tipo da fibra de carbono (Machado, 2002).

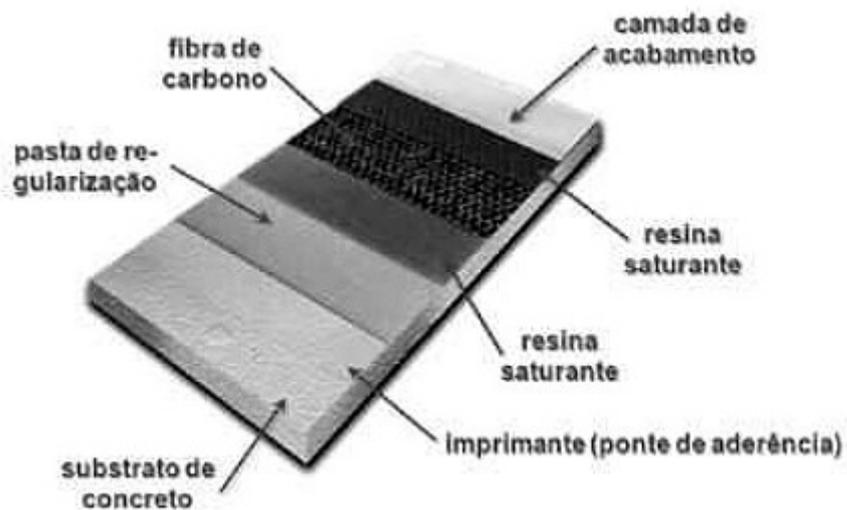
4.5.2.2 Técnica de aplicação

O futuro desempenho de um elemento estrutural reforçado com compósitos de fibras de carbono, está relacionado diretamente com a qualidade da aplicação do produto sobre a superfície dos elementos. Esse processo pode ser dividido em duas etapas, a preparação da superfície receptora e a aplicação do compósito (Souza; Ripper, 1998).

Para a aplicação do compósito é indispensável, que o elemento estrutural se encontre com a recuperação já executada. Inicialmente deve-se trabalhar cuidadosamente a superfície do concreto, por meio de jatos da água, areia ou limalhas metálicas para limpeza da superfície. O próximo passo é aplicar o imprimador primário, para obter uma ponte de aderência para os adesivos aplicados na sequência. Em seguida aplica-se o regularizador de superfície, obtendo uma superfície desempenada. Após aplica-se a resina epóxi de saturação e a manta também pré saturada com resina saturante. É necessário aplicar sobre a manta mais uma camada de resina saturante. A aplicação de revestimento estético, é opcional (Machado, 2002).

A Figura 20 apresenta a sequência recomendada para execução dos sistemas estruturados com fibras de carbono.

Figura 20 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono



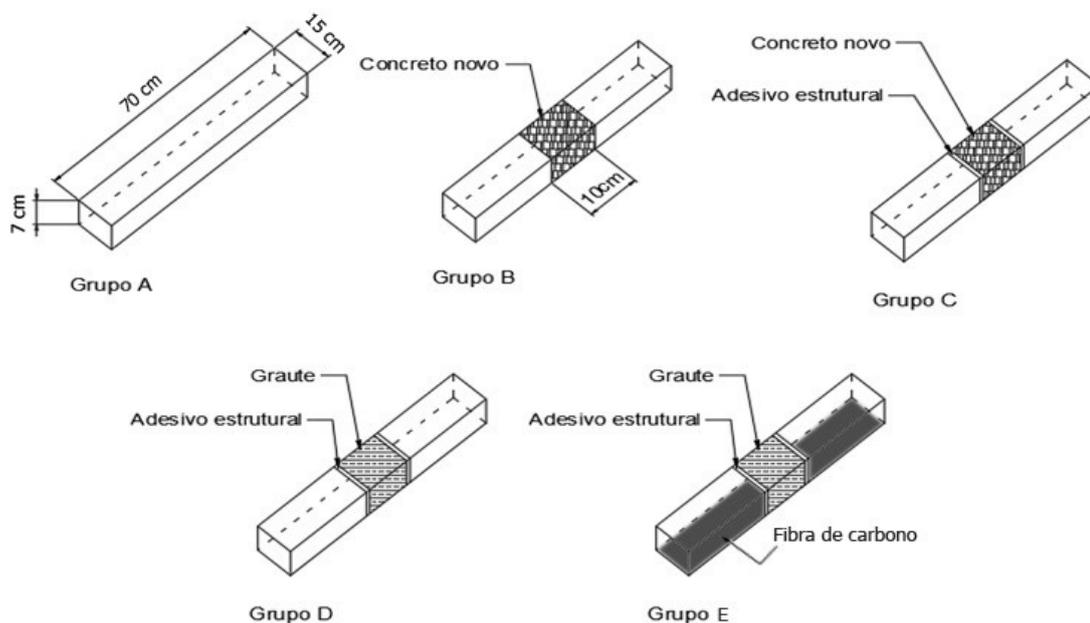
Fonte: Machado (2002)

5 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram ensaiadas vinte vigas de concreto armado, de seção 7x15x70 cm, submetidas a um ensaio de flexão. Para isso, cinco grupos de vigas serão considerados: grupo A: quatro vigas sem recomposição, para obtermos resultados de referência; grupo B: quatro vigas com recomposição, utilizando apenas uma nova mistura de concreto com mesmo traço; grupo C: quatro vigas recompostas com adesivo estrutural e uma nova mistura de concreto com mesmo traço; grupo D: quatro vigas recompostas com adesivo estrutural e graute; e por último, grupo E: quatro vigas recompostas com adesivo estrutural e graute, reforçadas com manta de fibra de carbono na parte inferior da viga. A recomposição será feita em toda seção central das vigas em 10 cm.

A Figura 21 apresenta as especificações de cada grupo.

Figura 21 - Caracterização dos grupos de vigas



Fonte: Adaptado de Santos (2018, p. 44)

5.1 Materiais utilizados

Para a fabricação das vigas foram utilizados os seguintes materiais:

- Fôrmas:
 - Chapa de madeirite plastificado com 15 mm de espessura;
 - Desmoldante;
 - Parafuso de aço para madeira.
- Concreto armado:
 - Aço CA-60 com 4,2 mm de diâmetro;
 - Brita 0 com 12 mm de diâmetro máximo;
 - Areia média;
 - Cimento Votoran todas as obras.
- Equipamentos:
 - Balança mecânica, para dosagem dos materiais;
 - Betoneira de eixo inclinado;
 - Martelete, para adensamento do concreto.

Para recomposição foram utilizados:

- Isopor com 30 mm de espessura, para o espaço da recomposição;
- Graute SikaGrout – 250, da marca Sika;
- Adesivo epóxi AF, da marca Vedacit ;

Para o reforço das vigas foram utilizados:

- Resina epóxi 2004, da marca Redelease;
- Manta de fibra de carbono;
- Espátula Dentada de 10 cm;
- Rolete tira bolhas 14x80 mm;

O concreto e o graute utilizados na recomposição foram preparados com o auxílio de um martelete e uma haste para misturar argamassa.

As Vigas foram ensaiados na prensa DL 30000 disponível na UTFPR - CM, e, para obtenção do f_{ck} do concreto, foram ensaiados corpos-de-prova na prensa hidráulica disponível no laboratório de materiais da mesma universidade.

5.2 Elaboração das vigas

Para elaborar as vigas foram utilizadas 10 fôrmas, cada uma com espaço para duas vigas, totalizando 20 vigas concretadas de uma vez, como demonstra a Figura 22.

Figura 22 - Fôrmas para elaboração das vigas

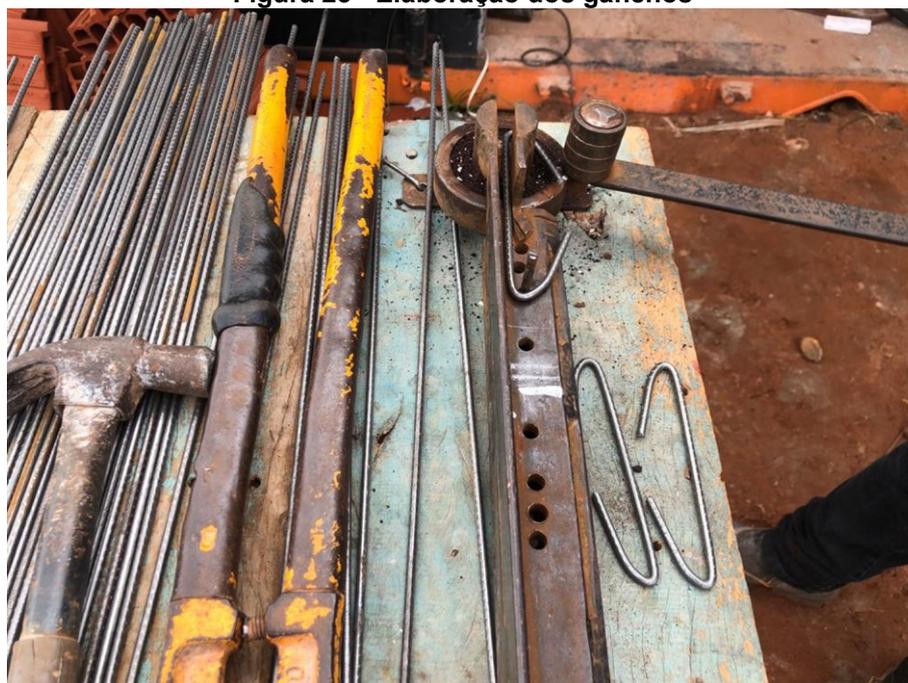


Fonte: Autoria própria (2023)

Para armadura, foram utilizadas duas barras com 68 cm de aço CA-60 4,2 mm longitudinais (armadura positiva), dois ganchos de 4,2 mm a 4 cm das extremidades e mais dois ganchos a 20 cm dos ganchos da extremidade, dobrados manualmente com auxílio de uma dobradeira.

A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 mostram a elaboração dos ganchos, a elaboração das armaduras e as armaduras prontas com o isopor para o espaço da recomposição.

Figura 23 - Elaboração dos ganchos



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24 - Elaboração das armaduras



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 25 - Armaduras prontas com espaço para recomposição



Fonte: A autoria própria (2023)

O concreto foi dosado conforme o traço de 1: 2,5: 2,5 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), e a relação água/cimento: 0,55. Para a dosagem correta foi utilizado uma balança, para pesagem do cimento e água e um balde para o volume da areia e brita.

A Figura 26 apresenta as fôrmas prontas para concretagem.

Figura 26 - Fôrmas prontas para concretagem



Fonte: Autoria própria (2023)

O concreto foi misturado em betoneira de eixo inclinado.

Para o adensamento foram aplicados golpes nas fôrmas com auxílio de um marteleto, e o concreto foi colocado nas formas com as armaduras prontas para concretagem, e o isopor para deixar um espaço vazio, a fim de realizar a recomposição.

Na Figura 27 é mostrado as fôrmas já concretadas.

Figura 27 - Fôrmas concretadas

Fonte: Autoria própria (2023)

Depois da concretagem, os elementos foram cobertos por uma lona plástica com o objetivo de manter a superfície do concreto úmida por mais tempo, como demonstra a Figura 28.

Após sete dias, as vigas foram levadas para recomposição.

Figura 28 - Vigas cobertas com lona

Fonte: Autoria própria (2023)

5.3 Recomposição das vigas

Com o objetivo de realizar a recomposição das vigas foi necessário realizar a limpeza da superfície, com o propósito de garantir perfeita aderência da recomposição. Posteriormente o preparo da superfície, foi repetido a dosagem do concreto antigo, a seção central das vigas do grupo B foi concretada com esse novo concreto e a seção central das vigas do grupo C recebeu a aplicação de adesivo epóxi antes de ser concretada.

Após, foi dosado o graute, apenas com água, para aplicação no grupo D e E, a mistura foi realizada com o auxílio de um martelo e uma haste para misturar argamassa e ambos os grupos receberam aplicação de adesivo epóxi antes do grauteamento.

As vigas ficaram 28 dias no mesmo local que estavam, cobertos com a lona, da mesma forma anterior, para os futuros ensaios.

A Figura 29 mostra as vigas já recompostas.

Figura 29 - Vigas recompostas



Fonte: Autoria própria (2023)

5.4 Aplicação da manta de carbono

Após 21 dias, as vigas do grupo E receberam a aplicação da manta de fibra de carbono.

A Figura 30 e Figura 31 demonstram a aplicação da resina epóxi nas vigas e do rolo tira bolhas sobre a manta de carbono.

Figura 30 - Aplicação da resina epóxi nas vigas



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 31 - Aplicação do rolo tira bolhas sobre a manta de carbono

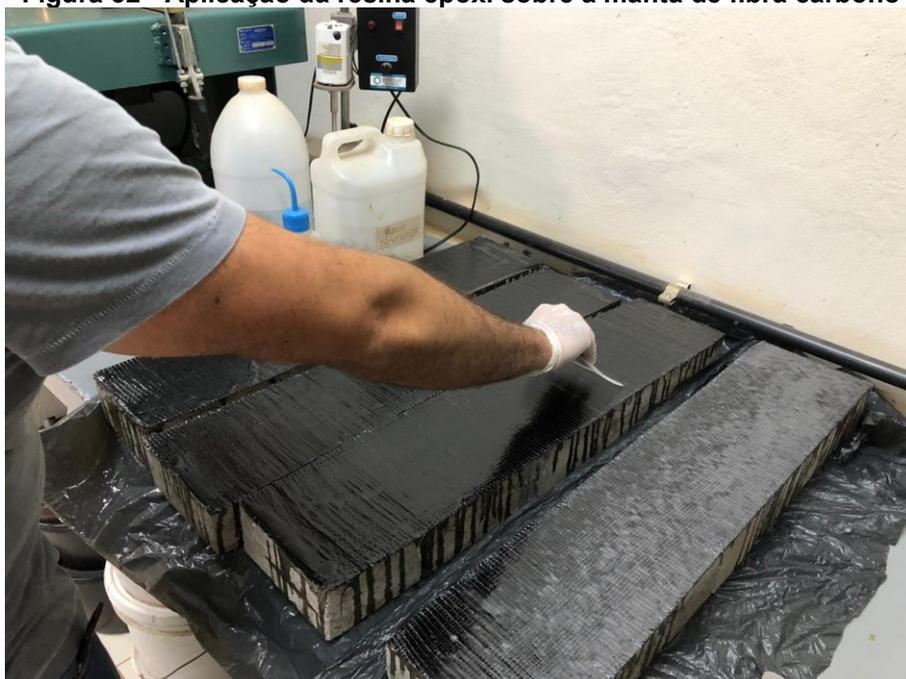


Fonte: Autorial própria (2023)

Quando a resina epóxi aplicada sobre as vigas estiver em ponto de gel, é necessário aplicar resina sobre a manta de carbono.

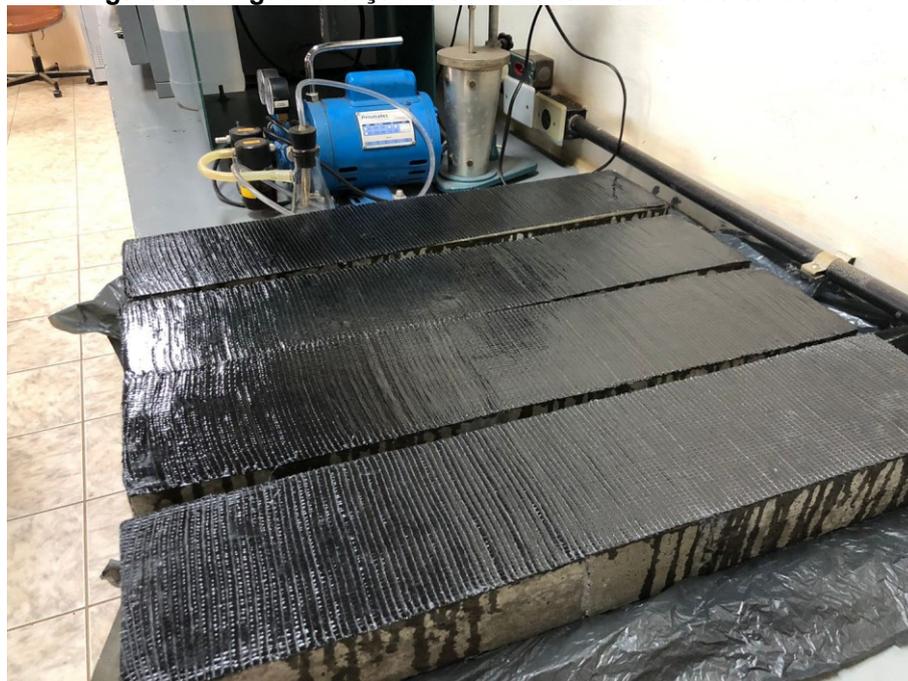
A Figura 32 e Figura 33 mostram a aplicação da resina epóxi sobre a manta de fibra carbono e as vigas reforçadas com manta de fibra de carbono prontas após 5 dias da aplicação da resina epóxi.

Figura 32 - Aplicação da resina epóxi sobre a manta de fibra carbono



Fonte: Autorial própria (2023)

Figura 33 - Vigas reforçadas com manta de fibra de carbono



Fonte: Aatoria própria (2023)

5.5 Ensaio de compressão dos corpos-de-prova

Com o objetivo de descobrir o f_{ck} calculado com o real, foram separados corpos de prova, de diâmetro 10 cm e comprimento 20 cm, conforme a NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015) retirados da primeira concretagem, o mesmo processo se repetiu para o graute.

A Figura 34 e Figura 35 mostram os corpos de prova de concreto e de graute.

Figura 34 - Corpos-de-prova de concreto



Fonte: Aatoria própria (2023)

Figura 35 - Corpos-de-prova de graute



Fonte: Aatoria própria (2023)

Os corpos-de-prova de concreto e graute foram ensaiados à compressão na prensa, como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Ensaio de compressão

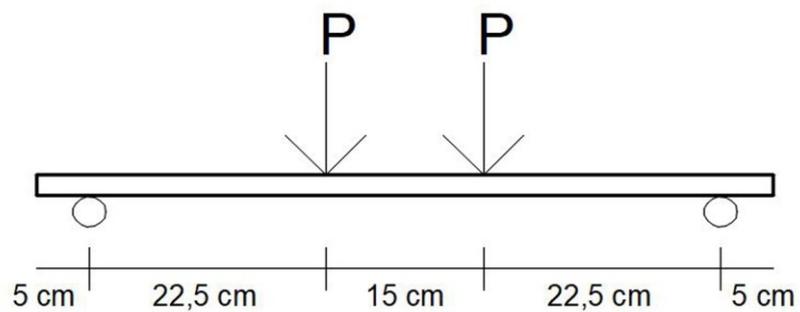
Fonte: Autoria própria (2023)

5.6 Ensaios de tração por flexão das vigas

O ensaio de tração por flexão nas vigas é realizado através da aplicação de duas cargas concentradas simétricas aplicadas na viga. Por meio da aplicação dessas cargas a viga biapoiada recebe um carregamento gradual até atingir sua ruptura.

Figura 37 e Figura 38 mostram o esquema de execução do ensaio realizado, e o ensaio de uma viga.

Figura 37 - Esquema do ensaio de tração por flexão



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 38 - Ensaio de uma viga



Fonte: Autoria própria (2023)

6 RESULTADOS

6.1 Resistência a compressão do concreto e graute (fc)

Foram testados os corpos-de-prova de concreto e graute com dimensão 10x20 cm, conforme a NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018), e os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência à compressão do concreto e graute

| Material | Corpo de prova | Idade (dias) | Área (mm ²) | Força normal máxima (kN) | Tensão normal máxima (MPa) |
|----------|----------------|--------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Concreto | 1 | 37 | 7389,8 | 210,9 | 28,53 |
| | 2 | 37 | 7389,8 | 226,4 | 30,64 |
| | 3 | 37 | 7542,9 | 218,7 | 28,99 |
| | 4 | 37 | 7542,9 | 219,3 | 29,07 |
| Graute | 1 | 30 | 7542,9 | 381,9 | 50,63 |
| | 2 | 30 | 7389,8 | 387,2 | 52,40 |
| | 3 | 30 | 7238,2 | 364,3 | 50,33 |
| | 4 | 30 | 7389,8 | 375,75 | 50,85 |

Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme descrito na NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento (ABNT,2022), para o cálculo do fck do concreto de pequenos volumes (menor que 10 m³), a seção 6.2.3.3, diz:

Nos casos de concreto produzido por betonadas de pequeno volume e sempre que o número total de betonadas (lote) seja superior ao de exemplares da amostra que representa esse lote, ou seja, trate-se de amostragem parcial, pode-se dividir a estrutura em lotes correspondentes a no máximo 10 m³ e amostrá-los com número de exemplares entre 2 e 5. Nestes casos, denominados excepcionais, o valor estimado da resistência característica é dado por: $f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1$ (ABNT NBR 12655, 2015, p.21)

em que:

- Ψ_6 é encontrado na figura 39, para valores entre 2 e 5
- f_1 é o valor da menor resistência.

Figura 39 - Valores de Ψ_6

| Condição de preparo | Valores de Ψ_6 | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | Número de exemplares (n) | | | | | | | | | | |
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | ≥ 16 |
| A | 0,82 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,99 | 1,00 | 1,02 |
| B ou C | 0,75 | 0,80 | 0,84 | 0,87 | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,96 | 0,98 | 1,00 | 1,02 |
| NOTA Os valores de n entre 2 e 5 são empregados para os casos excepcionais (conforme 6.2.3.3). | | | | | | | | | | | |

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015)

No caso do presente trabalho temos 4 exemplares, a norma permite escolher de 2 a 5 exemplares para esse caso específico. Para a escolha do Ψ_6 deve-se saber as condições de preparo do concreto (A, B ou C) de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), mostradas abaixo:

- Condição A: O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
- Condição B: O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.
- Condição C: O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 ou outro método normalizado.

Dessa forma, calculando com os dados da Tabela 1 e considerando

$f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1$, tem –se:

Para o concreto:

- $f_{ck,est} = 0,84 \times 28,53$
- $f_{ck,est} = 23,97$ MPa

Para o graute:

- $f_{ck,est} = 0,84 \times 50,33$
- $f_{ck,est} = 42,27$ MPa

A Figura 40 e Figura 41 apresentam os corpos-de-prova após os ensaios.

Figura 40 - Corpos-de-prova de concreto rompidos



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 41 - Corpos-de-prova de graute rompidos



Fonte: Autoria própria (2023)

6.2 Resistência a flexão.

Trinta dias após o processo de confecção e recomposição das vigas, os elementos foram submetidos à ensaio de flexão e os resultados apresentados na Tabela 2.

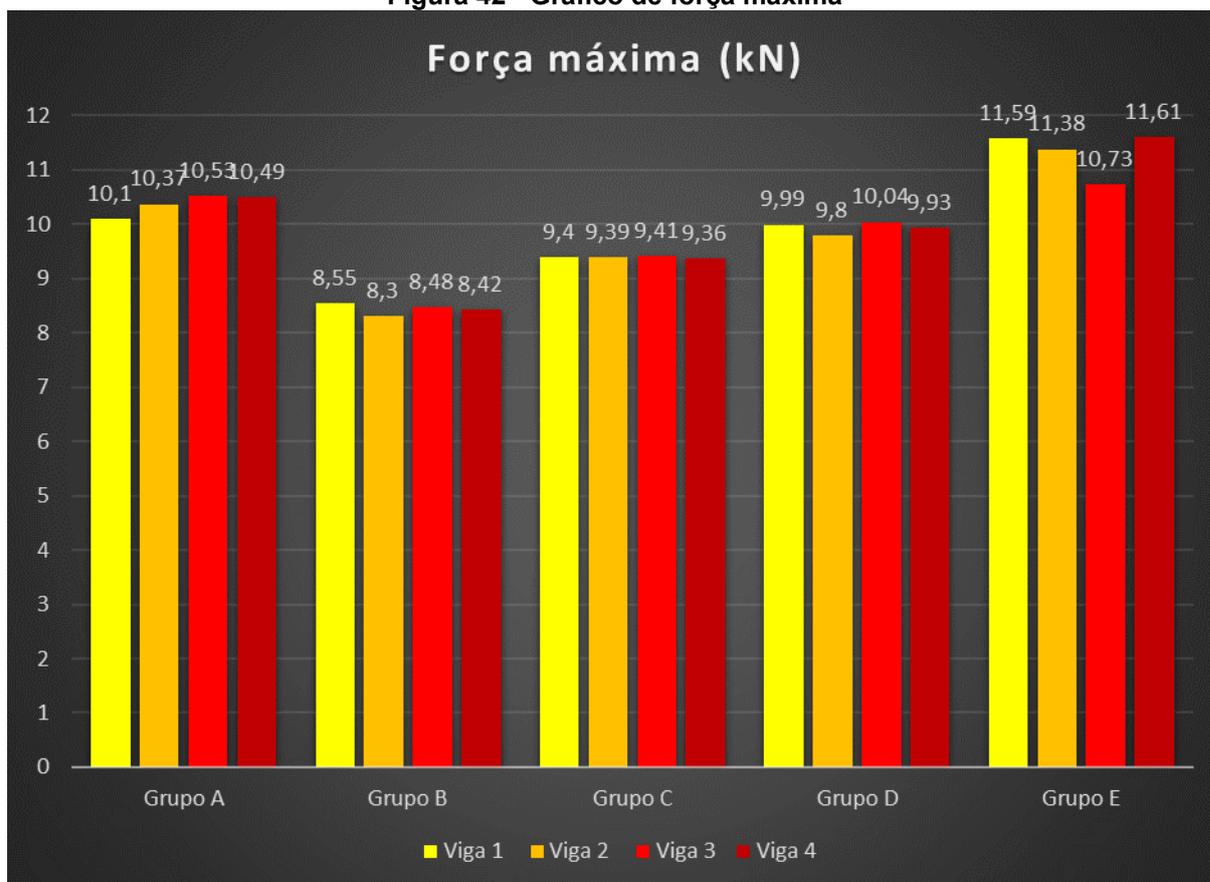
Tabela 2 - Resultados do ensaio de flexão das vigas

| Grupo | Área (mm ²) | Força máxima (kN) | Força máxima média (kN) | <i>Média (B,C,D,E)</i> |
|-------|-------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| | | | | <i>Média A (%)</i> |
| A | 11266,92 | 10,10 | 10,37 | 100 |
| | 10710,00 | 10,37 | | |
| | 11470,00 | 10,53 | | |
| | 11544,00 | 10,49 | | |
| B | 11312,80 | 8,55 | 8,44 | 81,4 |
| | 10974,20 | 8,30 | | |
| | 11475,00 | 8,48 | | |
| | 11215,80 | 8,42 | | |
| C | 11645,20 | 9,40 | 9,39 | 90,5 |
| | 11448,30 | 9,39 | | |
| | 11322,00 | 9,41 | | |
| | 11048,40 | 9,36 | | |
| D | 11167,92 | 9,99 | 9,94 | 95,9 |
| | 11253,60 | 9,80 | | |
| | 11088,00 | 10,04 | | |
| | 11248,76 | 9,93 | | |
| E | 11764,80 | 11,59 | 11,33 | 109,3 |
| | 10981,32 | 11,38 | | |
| | 11419,20 | 10,73 | | |
| | 11376,81 | 11,61 | | |

Fonte: Autoria própria (2023).

Para comparar os resultados do ensaio em relação a força máxima, a Figura 42 apresenta um gráfico com os resultados.

Figura 42 - Gráfico de força máxima



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se no gráfico que os resultados do grupo D, estão próximos aos resultados do grupo A. Os resultados do grupo B estão abaixo, e temos melhores resultados do grupo D em relação ao grupo B. O grupo E obteve resultados maiores que o grupo A.

Para concluir o ensaio, além dos resultados numéricos é importante identificar o local da ruptura das vigas. A Tabela 3 mostra os locais de ruptura das vigas.

Tabela 3 - Locais de ruptura das vigas

(continua)

| Grupo | Viga | Local de ruptura |
|-------|------|--------------------------|
| A | 1 | Abaixo da força aplicada |
| | 2 | Abaixo da força aplicada |
| | 3 | Abaixo da força aplicada |
| | 4 | Abaixo da força aplicada |

Tabela 3 - Locais de ruptura das vigas

(conclusão)

| Grupo | Viga | Local de ruptura |
|-------|------|--|
| B | 1 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| | 2 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| | 3 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| | 4 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| C | 1 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| | 2 | No concreto antigo |
| | 3 | Entre concreto de recomposição e concreto antigo |
| | 4 | No concreto de recomposição |
| D | 1 | No concreto antigo |
| | 2 | No concreto antigo |
| | 3 | Entre adesivo estrutural e concreto antigo |
| | 4 | No concreto antigo |
| E | 1 | Entre adesivo estrutural e concreto antigo |
| | 2 | Entre adesivo estrutural e concreto antigo |
| | 3 | Entre adesivo estrutural e concreto antigo |
| | 4 | Entre adesivo estrutural e concreto antigo |

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se na tabela que as vigas que foram recompostas apenas com concreto romperam exatamente na recomposição, devido à fragilidade da região, enquanto as outras vigas que receberam o adesivo estrutural tiveram locais de ruptura diferentes, uma das vigas teve ruptura semelhante aos das vigas referência.

Na Figura 43 observa-se a ruptura das vigas do grupo A, abaixo de onde foi aplicado umas das forças.

Figura 43 - Vigas do grupo A, rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 44 mostra as vigas do grupo B com o rompimento exatamente na recomposição.

Figura 44 - Vigas do grupo B, rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 45 refere-se as vigas rompidas do grupo C.

Figura 45 - Vigas do grupo C, rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 46 temos as vigas rompidas do grupo D

Figura 46 - Vigas do grupo D, rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 47 e Figura 48 mostram as vigas rompidas do grupo E, e seu lado inferior, observa-se que as rupturas ocorreram imediatamente após a recomposição.

Figura 47 - Vigas do grupo E, rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 48 - Lado inferior das vigas do grupo E rompidas



Fonte: Autoria própria (2023)

7 CONCLUSÃO

A partir da realização deste estudo, foi possível analisar a eficiência dos materiais utilizados no processo de recomposição. Assim como fazer uma análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no laboratório da UTFPR, em vigas reparadas e reforçadas utilizando, concreto, adesivo estrutural, graute e manta de fibra de carbono.

Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que:

A recomposição feita apenas com concreto, que é usualmente feita por mestre de obras e pedreiros, atingiu a ruptura mais rápida entre todas as vigas ensaiadas, atingiu 81,4% do valor de força máxima das vigas referência, e todas as vigas recompostas apenas com concreto romperam exatamente na recomposição.

A recomposição feita com adesivo e concreto teve melhores resultados que as feitas apenas com concreto, alcançando 90,5% do valor de força máxima das vigas referência, e não tiveram todas as rupturas exatamente na recomposição.

As vigas recompostas com adesivo estrutural e graute, tiveram um bom desempenho, alcançaram 95,9% do valor de força máxima das vigas referência, e algumas rupturas foram em locais semelhantes aos das vigas referência.

Por fim, as vigas reforçadas com manta de fibra de carbono obtiveram um aumento de 9,3%, na resistência em relação as vigas referência. Observou-se também que a resina teve um bom desempenho fazendo com que aderência da fibra e concreto fosse adequada.

O adesivo estrutural e o graute mostraram ser eficientes no processo de recomposição de vigas de concreto armado.

A recomendação para trabalhos futuros é a análise de reforço em pilares de concreto armado utilizando a manta de fibra de carbono.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- ARAÚJO, José Milton. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014.
- ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção**: patologia, reabilitação, prevenção. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988.

CARMONA, A. F.; MAREGA, A. Retrospectiva de la patologia em el Brasil: estudio estadístico. In: Jornadas em Español y Portugués sobre Estructuras y Materiales. **COLLOQUIA 88**, Madrid, CEDEX, IETcc, p. 23-100, mai. 1988.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DESEK. Relatório de vistoria e indicação de procedimentos para recuperação e reforço estrutural. **PAULIS-RT-01-2019-RO**. Abr. 2019. Disponível em: <https://www.paulistano.org.br/wp-content/uploads/2019/12/Documento-10.pdf>. Acesso em: 23 maio 2022.

GRANATO, J. E. **Patologia das construções**. São Paulo: AEA Cursos, 2012.

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

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2002.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NINCE, A. A. **Levantamento de dados sobre causas de deterioração de estruturas na região Centro-Oeste**. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

RIBEIRO, D. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152359/>. Acesso em: 23 maio 2022.

SANTOS, É. H. M. **Avaliação de técnicas de reparos em pilares de concreto armado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

SILVEIRA, L. **Reparos de estruturas de concreto**: blog de engenharia civil. 2009. Disponível em: <http://englucianosilveira.blogspot.com/2009/06/reparos-de-estruturas-de-concreto.html>. Acesso em: 23 março 2022.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.